

Zur Simulation von Einflußgrößen der Behaglichkeit und Energieeffizienz in Personenbahnhöfen

Entwicklung und Bewertung quantitativer und numerischer Verfahren

**Von dem Fachbereich für Architektur
der Technischen Universität Darmstadt**

**zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte**

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Volker Stute
aus Frankfurt am Main

Darmstadt 2010

Referent:	Prof. Dipl.-Ing.	Manfred Hegger
Koreferent:	Prof. Dr.-Ing.	Jürgen Stöffler
3. Gutachter:	Prof. Dr.-rer.nat.	Martin Kiehl

Tag der Einreichung:	01.06.2010
Tag der mündlichen Prüfung:	26.10.2010

Gewidmet meiner lieben Frau Daniela

Inhaltsverzeichnis

Danksagungen	i
Zusammenfassung der Arbeit	iii
Abstract	v
Resumen en español	vii
Resumé en français	ix
1 Einführung	1
1.1 Personenbahnhöfe	1
1.2 Energieeffizienz	1
1.3 Funktionalität	2
1.4 Komfort	7
1.5 Energieverbrauch im System „Bahn“	10
1.6 Ziel der Arbeit	11
2 Strukturanalyse	14
2.1 Struktur von Bahnhöfen	14
2.2 Bestandserfassung und Kategorisierung	26
3 Stand der Forschung	37
3.1 Begriffsdefinitionen	37
3.2 Komfort unterschiedlicher Verkehrsmittel und Reiseketten	47
3.3 Komfort in Gebäuden	57
3.4 Energieeffizienz von Gebäuden	78
3.5 Energieverbrauch in Bahnhöfen	84
3.6 Modelle	90
3.7 Software	105
4 Statistische Analyse thermodynamischer Kenngrößen in Bahnhöfen	110
4.1 Motivation	110
4.2 Zusammenhang zwischen statistischer Analyse und Energieeffizienz	111
4.3 Meßdaten	111
4.4 Analyse	112
4.5 Fazit und Beurteilung der Ergebnisse	150

5	Gesamtsystem Bahnhof	151
5.1	Modellierung Wirkungsgefüge	151
5.2	Simulation Wirkungsgefüge	167
6	Simulation thermodynamischer Vorgänge	175
6.1	Modellierung	175
6.2	Ergebnisse thermodynamischer Simulationen	185
7	Funktionalitäts- und Komfortmodell Personenbewegungen in Bahnhöfen	225
7.1	Motivation	225
7.2	Zielgrößen	225
7.3	Modellierung	227
7.4	Messungen und Erhebungen zu Personenbewegungen	259
7.5	Simulationsszenarien	261
7.6	Darstellung der Simulationsergebnisse	262
7.7	Auswertung und Diskussion	270
8	Diskussion	272
8.1	Bewertung der Untersuchungen	272
8.2	Ausblick	275

Danksagungen

Die fruchtbare Beschäftigung mit dem Thema der Arbeit und ihr erfolgreicher Abschluß wären nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung einer Vielzahl von Personen und Institutionen. Daher gilt mein besonderer Dank

- Herrn Prof. Hegger, für das Vertrauen, das er von Anfang an in meine Arbeit gesteckt hat, seine langjährige Betreuung, sein Gutachten und Prüfung, seine Funktion als Ideengeber, für Überblick, wenn ich mit Detailfragen beschäftigt war, für die Möglichkeit, einen sechssemestrigen Lehrauftrag an seinem Fachgebiet durchzuführen für die Unterstützung bei der Einwerbung von Drittmitteln,
- Herrn Prof. Dr. Jürgen Stöffler für seine Zeit und Ruhe als erfahrender Berater während meines gesamten Diplom- und Promotionstudiums, für Motivation, Gutachten und Prüfung,
- Herrn Prof. Dr. Martin Kiehl, für Gutachten und Prüfung, und insbesondere für sein spürbares Interesse an der Schnittstelle zwischen Mathematik und Architektur,
- den beiden weiteren Prüfern sowie allen Gästen der Prüfung danken, die durch ihr Erscheinen Interesse an meiner Arbeit bekundet haben,
- Herrn Siegfried Delzer, für seine Unterstützung als fachlicher Mentor, insbesondere in kybernetischen und numerischen Fragestellungen, für die Leihgabe von Meßtechnik für meine Messungen im Darmstädter Hbf und seine Beratung bei den thermischen Gebäudesimulationen,
- Herrn Dr. Gerrit Eichner von der Universität Gießen, für die intensive statistische Beratung und Unterstützung mit den freien Software-Paketen *LaTeX* und *R*,
- den Herren Hartmut Schwarz und Adolf Wagner von der *Deutschen Bahn AG*, Bereich Personenbahnhöfe, für die Unterstützung des Kooperationsprojektes zwischen TU Darmstadt und DB Station & Service AG, für die Drittmittel, für den Zugang zu Daten bezüglich Bahnhöfen sowie ihr Vertrauen in mein Projekt,
- den Herren Ulrich Braun und Andreas Waldorf, ebenfalls DB Station & Service AG, für ihre fachliche Unterstützung vor allem in Bezug auf technische Anlagen und elektrische Energie,
- den Herren Werner Klein, Eino Tank, Manfred Schlums, Roland Kirchhof und Reinhold Stein, Deutsche Bahn AG, Bereich Infrastruktur, für Ihre Unterstützung in meinem Vorhaben, als Mitarbeiter der Deutschen Bahn zu promovieren, für den Zugang zu Daten der Deutschen Bahn AG sowie für Freiräume für meinen Lehrauftrag an der TU Darmstadt und Recherchen in technischen Bibliotheken,
- dem Unternehmen Deutsche Bahn und allen seinen Mitarbeitern, die mich stets freundlich, kooperativ und engagiert bei meinem Projekt, meinen Recherchen und meinen Messungen vor Ort unterstützt haben, insbesondere bei den Mitarbeiter an den ServicePoints sowie bei die Technischen Gebäudemanager in den Referenzbahnhöfen,
- dem Unternehmen *meteomedia*, insbesondere Herrn Alexander Lehmann, für die unkomplizierte, kostenlose und umfangreiche Lieferung von Wetterdaten als vollständige Zeitreihen und die fachliche Beratung bezüglich Wetter und Meteorologie,
- den Unternehmen *PCE Deutschland* und *Internotional worX GmbH* für Rabatte beim Verkauf von Meßtechnik,
- all meinen Freunden für ihre Geduld, die sie in den sieben Jahren meiner zeitintensiven Beschäftigung mit der Doktorarbeit gezeigt haben, vor allem denjenigen, die sich meinen Vortrag vor meiner Prüfung probenhalber angehört und konstruktiv kritisiert, und mich bei der Übersetzung des Abstracts unterstützt haben,

- meinem lieben Freund Dirk Wirz, der zu jeder Tag- und Nachtzeit bereit war, kurzfristig herbei zu eilen, um erfolgreich Speicherlecks in den Simulationsalgorithmen zur Personenbewegung aufzuspüren und zu beseitigen,
- meiner Familie, meinen Eltern Gerti und Prof. Dr. Winfried Stute, die durch ihre Erziehung, ihr Vertrauen und Geduld meinen Weg bis hin zur Promotion überhaupt ermöglicht haben, meiner Mutter, die immer ansprechbar war, wenn die Doktorarbeit endlos schien, und meinem Vater, der mehrfach meinen Dissertationstext korrigiert hat und Ansprechpartner für mathematische Modellierungsfragen war, meiner Schwester Petra danken, die mir immer wieder Mut gemacht hat,
- und ganz besonders meiner lieben Ehefrau Daniela, für die Jahre ihre Geduld, ihres Vertrauens und ihrer grenzenlosen Unterstützung. Sie hat mich als Doktoranden kennengelernt, geheiratet und nie einen Zweifel daran gehabt, daß dieses Projekt eines Tages erfolgreich abgeschlossen werden würde. Sie hat sich immer wieder Problemstellungen angehört, Zeitpläne mit mir ausgearbeitet und auf meine Gesundheit geachtet.

Zusammenfassung der Arbeit

Personenbahnhöfe dienen als Schnittstelle zwischen Zugverkehr und anderen öffentlichen und privaten Verkehrsmitteln. Ihre zentrale Aufgabe besteht darin,

- Reisenden ein Umfeld zu bieten, in dem sie *pünktlich*, *streßfrei* und *sicher* Züge erreichen,
- Zügen eine Infrastruktur zu bieten, in der sie Reisende aufnehmen und absetzen können.

Sie sind hochdynamische und in ihrer großen Anzahl sehr heterogene Systeme, die von stark schwankenden Verkehrs- und Wettersituationen beeinflußt werden.

Bahnhöfe sind Teil komplexer Reiseketten, die aus der Nutzung öffentlicher und privater Verkehrsmittel bestehen. Diese Reiseketten stehen in Konkurrenz zum motorisierten Individualverkehr, der keinen Wechsel der Verkehrsmittel und somit keine Infrastruktur zum Umsteigen erfordert.

Da Komfort ein wichtiges Entscheidungskriterium für die Wahl zwischen alternativen Reiseketten ist, sollten Bahnhöfe ein Behaglichkeitsniveau bieten, welches sich homogen an das in den Zügen anfügt und konkurrenzfähig zum Individualverkehr ist. Die Sicherstellung des *thermischen Komforts* erfordert in bestimmten Situationen den Einsatz von Energie. Die Optimierung der Energieeffizienz bedeutet die Minimierung des Energieverbrauchs bei gleichzeitiger Sicherstellung eines angemessenen Funktionalitäts- und Komfortniveaus.

Die *Anordnung* und *Trennung* der Gebäudezonen unter den Aspekten Energieverbrauch, Komfort und Funktionalität kann zu sich widersprechenden Zielen führen: Die Durchlässigkeit für Menschen versus die Durchlässigkeit für Wärme, Luft und Licht. *Optimale* Lösungen erfordern ein stabiles Gleichgewicht, aber auch die Möglichkeit einer dynamischen Regelung.

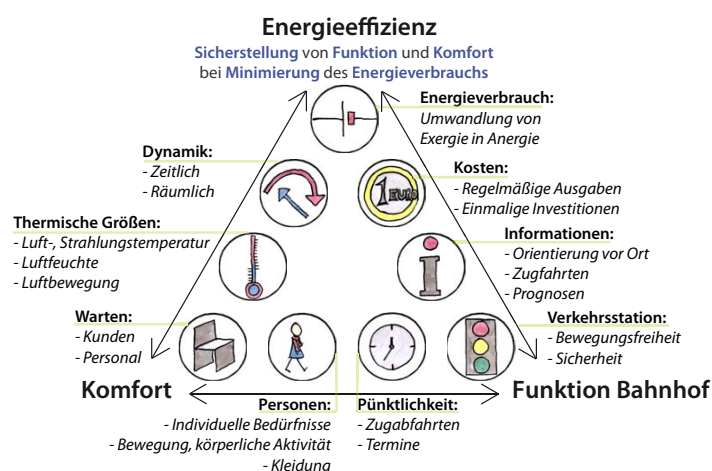


Abbildung 1: Relevante Größen hinsichtlich Komfort und Energieeffizienz in Bahnhöfen

Im Verlauf der Arbeit werden vier zentrale Fragen zu Bahnhöfen analysiert und beantwortet:

1. Welche Größen sind für Energieeffizienz, thermischen Komfort und Funktionalität relevant?
2. Lassen sich die Größen mit Hilfe von quantitativen und numerischen Methoden optimieren?
3. Welche allgemeinen Aussagen folgen aus den beispielhaften Analysen zur Energieeffizienz?
4. Wie müßten die Erkenntnisse praktisch angewendet und die Modelle erweitert werden?

Die relevanten Größen, welche insbesondere durch Anwendung des *Sensitivitätsmodells* von Frederic Vester (Abschnitt 5.1.1) identifiziert werden, sind in Abbildung 1 dargestellt.

Traditionelle, d.h. rein qualitative Analysewerkzeuge reichen für die Erforschung des dynamischen Systems Bahnhof nicht aus. Es gibt nicht *das eine* Modell, welches alle relevanten Parameter auf einmal numerisch optimieren kann. Daher werden in dieser Arbeit fünf verschiedene *numerische* und *quantitative Verfahren* verwendet, davon zwei neu entwickelt, die jeweils einen Teilaspekt von Bahnhöfen modellieren und simulieren (siehe Abbildung 2).

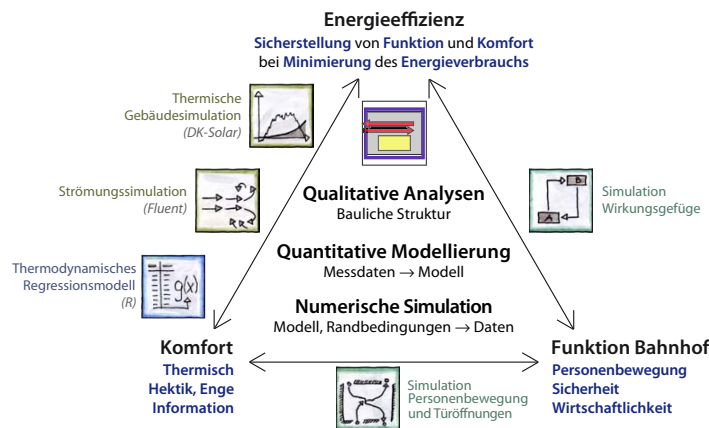


Abbildung 2: Numerische und quantitative Werkzeuge zur Modellierung von Bahnhöfen

Die mathematischen Modelle könnten folgendermaßen in der Praxis eingesetzt werden:

- Regelung und Steuerung von Bahnhöfen im Betrieb
- Vergleichendes Energiecontrolling durch Monitoring und Simulation
- Planung von Neu- und Umbauten:
 - Optimierung durch Testen von Varianten
 - Prognose extremer thermischer und betrieblicher Zustände

Weiterführende Themen für die Forschung wären:

- Erhebung von Daten zur Entwicklung eines dynamisch-thermischen Komfortmodells
- Numerische Optimierung durch Verknüpfung der Verfahren
- Entwurf gänzlich neuartiger, dynamischer Zonengrenzen

Die quantitativen Analysen zeigen, daß Bahnhöfe nicht als statische Bauwerke, sondern als *dynamische Architektur* betrachtet, geplant und betrieben werden müssen. Dabei ist es nötig und mit den beschriebenen Werkzeugen auch möglich, zukünftige Zustände kurzfristig zu prognostizieren und bereits im Vorfeld darauf zu reagieren.

Abstract

Passenger railway stations serve as an interface between public railway services and other public or private transport systems. Their main tasks are to enable

- Travellers to reach their scheduled train *on time, safely* and *unstressed* and
- Trains to safely pick up travellers from cities and communities and bring them to their destination.

They are highly dynamic and heterogeneous systems which are significantly impacted by changing weather and traffic conditions.

Railway stations are part of complex travel chains composed of both public and individual transportation. These chains compete with individual motorized traffic, which requires no change of means of transportation from door to door and thus respective building infrastructure.

For competitive reasons it is eminent to keep a certain comfort level in the stations, preferably comparable to the level provided in vehicles. In order to ensure thermal comfort in certain circumstances energy input is required. The optimization of energy efficiency is the minimization of energy consumption while at the same time ensuring a certain level of comfort and also functionality. The *arrangement* and *separation* of building areas under consideration of energy consumption, comfort and functionality might lead to contradictory objectives: permeability for people vs. permeability for thermal energy, air and light. *Optimal* solutions require both a stable balance and the possibility for dynamic regulation.

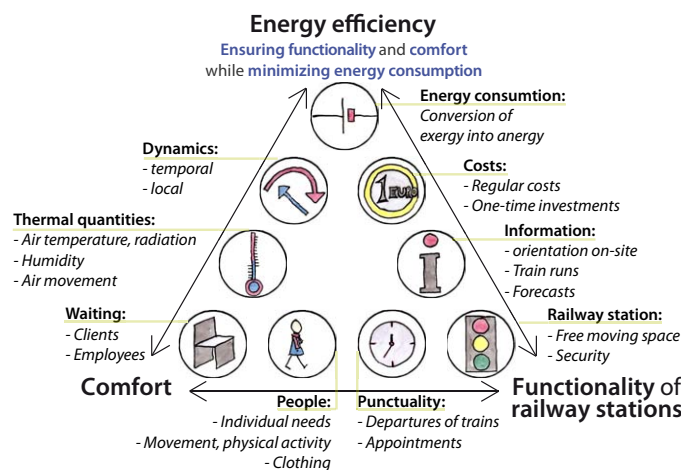


Abbildung 3: Relevant parameters for optimization of energy efficiency, comfort and functionality

In the course of the thesis the following four key aspects are being analysed and solutions proposed:

1. What are the relevant parameters for optimization of energy efficiency, comfort and full functionality of a public railway station?
2. To what extent are quantitative and numeric methods applicable to support the optimization of stations in terms of energy efficiency and comfort?
3. What are general conclusions to be drawn from this exemplary analysis?
4. How can the results be used in practise and what would be worthwhile topics for further or additional research?

All relevant parameters, identified mainly through application of Sensitivity Model by Frederic Vester, are illustrated in figure 3.

Traditional purely qualitative analytical tools were found insufficient for a depletive analysis of complex railway station systems. There is no *one* model which is capable of numerically optimizing all relevant parameters in parallel. Hence five different *numerical* and *quantitative* methods, two of them newly invented, are applied in this thesis to model and simulate stations in variable ways (see figure 4).

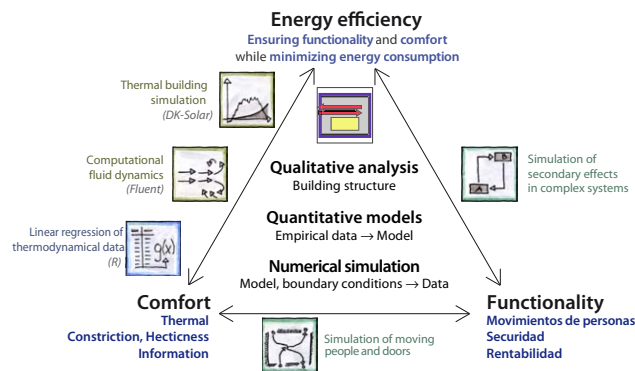


Abbildung 4: Numerical und cuantitative tools for modeling railway stations

The mathematical models might be used in practice as follows:

- Regulation and control of active stations
- Comparative energy controlling via monitoring and simulation
- Design and redesign of buildings for public transportation:
 - Optimization through testing of alternative variants
 - Forecasting of extreme situations

Additional research topics could be:

- Data ascertainment for a thermal comfort model for dynamic situation
- Numeric optimization by linking of the tools describe above
- Development of new dynamic climatic zone boundaries

The quantitative analysis shows that stations should be regarded, planned and operated as *dynamic architecture* instead of static buildings. The findings of this thesis enable the essential capability of anticipating future situations in order to be in position to act beforehand.

Resumen en español

Las estaciones de tren son intersecciones entre el tráfico ferroviario y otros medios de transporte, tanto públicos como privados. Sus principales tareas son:

- Brindar a los pasajeros un ambiente en el que puedan llegar *puntuales* y *seguros* a sus trenes
- Ofrecer una infraestructura a los trenes para que puedan dar entrada y salida a los pasajeros.

Son sistemas altamente dinámicos, bajo la influencia de condiciones variantes tanto de tráfico como climáticas y en su mayoría muy heterogéneas.

Las estaciones de tren forman parte de cadenas de movilidad, componiéndose del uso de transportes colectivos y privados. Estas cadenas hacen la competencia al tráfico individual motorizado, el cual no requiere cambio de vehículo de transporte y por eso no necesita infraestructura para el transbordo.

Ya que el confort juega un papel importante en la decisión en favor de una opción de cadena de movilidad alternativa, las estaciones tendrían que ofrecer un nivel de comodidad competitivo y comparable al nivel dentro de los trenes. En ciertas situaciones, el suministro del confort térmico requiere del consumo de energía. La optimización eficaz de energía significa la minimización del consumo de energía mientras se asegura un nivel de confort y funcionalidad adecuado.

El *orden de colocación* y la *separación de zonas* de un edificio bajo los criterios de bajo consumo de energía, adecuado confort y eficiente funcionalidad puede llegar a destinos contrarios: La permeabilidad de las personas contra la permeabilidad del calor, aire y luz. Las soluciones *óptimas* requieren un equilibrio estable igual que la posibilidad del control dinámico.

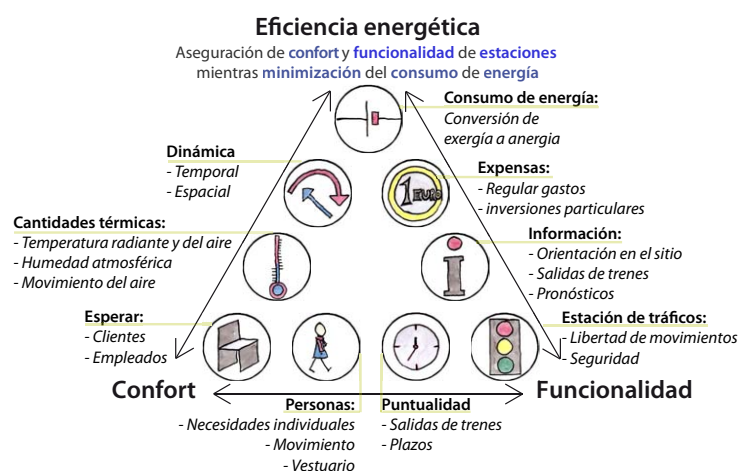


Abbildung 5: Cantidades relevantes en cuanto a confort y uso eficiente de la energía en estaciones

A lo largo de la tesis, se analizan y contestan las siguientes cuatro preguntas centrales:

1. ¿Cuáles son las cantidades relevantes para el uso eficaz de energía, confort y funcionalidad?
2. ¿Es posible optimizarlas con ayuda de métodos cuantitativos y numéricos?
3. ¿Cuáles son las proposiciones generalizadas resultado de los análisis empleados?
4. ¿Cómo se tendrían que aplicar los conocimientos de manera práctica y para ampliar los modelos desarrollados en la tesis?

Las cantidades relevantes, que fueron identificadas sobre todo por el *Modelo de Sensibilidad* de Frederic Vester, se muestran en la figura 5.

Las herramientas analíticas tradicionales y cualitativas no son suficientes para la investigación del sistema dinámico „estación de trenes“. Sin embargo, no existe *el* modelo, que pueda optimizar todos los parámetros relevantes a la vez. Por eso hay cinco herramientas *numéricas y cuantitativas* que se aplican y desarrollan en este trabajo, cada una de ellas modelando y simulando ciertos aspectos parciales del sistema. Las herramientas son simbolizadas en la figura 6.

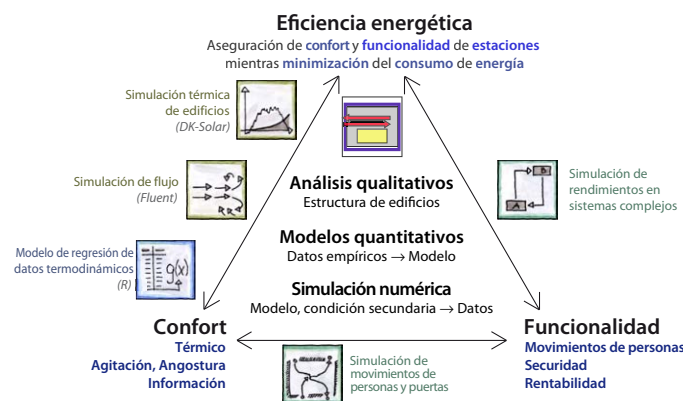


Abbildung 6: Herramientas numéricas a cuantitativas para la modelación de estaciones de tren

Se pueden aplicar los modelos matemáticos prácticamente para:

- Regulación y control de estaciones en funcionamiento
- Control de energía comparativo con simulaciones y vigilancia
- Diseño de nuevas construcciones y modificaciones
 - Optimización por comprobación de variantes
 - Previsión de estados térmicos y de servicio

Investigaciones hechas por adelantado pueden ser:

- Recolección de datos para desarrollar un modelo de confort en situaciones dinámicas
- Optimización numérica por vincular las herramientas numéricamente
- Diseño de nuevos márgenes dinámicos de zonas térmicas y funcionales en estaciones de tren

Los análisis cuantitativos muestran que las estaciones de tren no funcionan como edificios estáticos, sino que hay que verlas, planearlas y accionarlas como *arquitecturas dinámicas*. Por eso es necesario, y con las herramientas mostradas es posible, pronosticar condiciones futuras a corto plazo y reaccionar antes de que se realicen.

Resumé en français

Les gares sont les points d'échange entre les réseaux ferroviaires et d'autres moyens de transport privés ou publics et ont les fonctions principales suivantes:

- offrir la possibilité aux passagers d'accéder à leur train d'une manière *ponctuelle, sans stress et en toute sécurité*
- créer et maintenir pour les trains l'infrastructure nécessaire et optimale dans laquelle les passagers arrivent ou partent.

Les gares sont dans leur multitude des systèmes très hétérogènes et hautement dynamiques qui sont soumis à des changements brusques de mouvements à l'intérieur ainsi qu'à des conditions météorologiques variables à l'extérieur. Ce sont de fait des maillons intégrés à la chaîne complexe des transport privés et publics en concurrence directe avec le transport en véhicule individuel, lequel ne nécessite aucune infrastructure pour changements ou correspondances.

Comme le confort est un critère décisif dans le choix du mode de transport, les gares se doivent d'offrir un niveau de bien-être thermique similaire à celui des trains et comparable aux conditions du transport individuel, ce qui dans de nombreux cas un investissement énergétique significatif. L'optimisation du rendement énergétique - signifiant la minimisation de la consommation d'énergie tout en assurant un niveau de fonctionnalité et de confort approprié - devient alors primordiale.

La définition et l'agencement des différentes zones de la gare peuvent - en matière de consommation d'énergie, de confort et de fonctionnalité - viser parfois des buts contradictoires: permettre le mouvement fluide des voyageurs peut par exemple s'opposer à l'optimisation énergétique des flux des températures, d'air et de lumière. Les solutions optimales doivent assurer un équilibre durable entre les éléments essentiels tout en permettant une régulation dynamique.

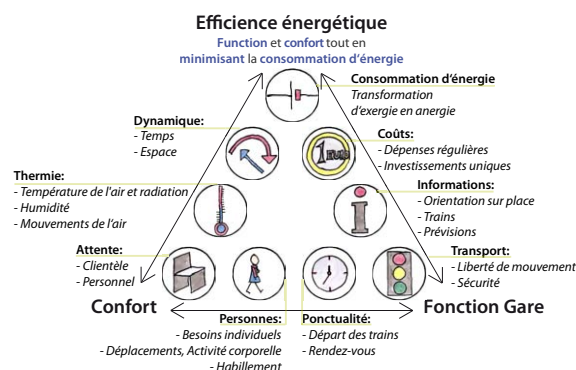


Abbildung 7: Données agissant sur le confort et l'efficacité énergétique des gares

Le document présent analyse et traite les quatre questions clé concernant les gares:

1. Quelles données doivent être prises en compte dans l'analyse du rendement énergétique et de la fonctionnalité de la gare?
2. Quelles données peut-on optimiser en utilisant des outils quantitatifs et numériques?
3. Quelles sont les thèses qui résultent d'analyses des cas concernant le rendement énergétique?
4. Comment faut-il appliquer ces résultats afin de développer des modèles ?

Les données essentielles, identifiées en particulier grâce à l'utilisation du *modèle de sensibilité* de Frédéric Vester sont présentées dans le schéma n°7.

Les outils d'analyse traditionnels, c'est à dire purement qualitatifs, ne suffisent pas pour l'analyse du système dynamique qu'est la gare. Il n'existe pas non plus *un seul* modèle proposant une optimisation chiffrée de tous les paramètres. C'est pourquoi ce document présente, et en partie développe cinq procédés *numériques* et *quantitatifs*, qui modélisent et simulent un aspect des gares, voir schéma n°8.

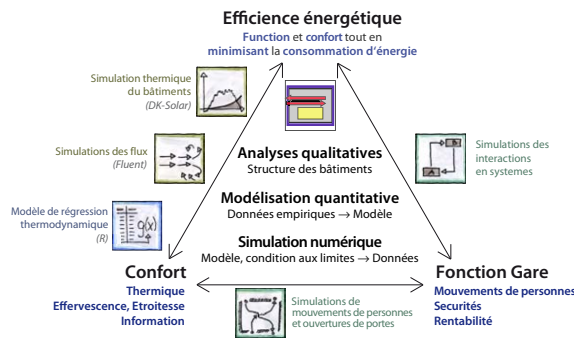


Abbildung 8: Outils numériques et quantitatifs pour la modélisation des gares

Les modèles mathématiques peuvent être utilisés dans la pratique de la façon suivante:

- réglage et gestion de gares en fonctionnement
- contrôle énergétique comparatif par surveillance et simulation
- planification de nouvelles gares et restructurations d'anciennes:
 - optimisation par le test de variables
 - prévision de variations thermiques et fonctionnelles extrêmes.

D'autres sujets de recherche seraient:

- relevé des données pour le développement d'un modèle de confort dynamique
- optimisation numérique par croisement des procédés
- conception et réalisation de zones dynamiques totalement neuves.

Les analyses quantitatives montrent que les gares ne doivent pas être considérées comme des bâtiments statiques, mais doivent être pensées, conçues et gérées comme une structure *architecturale dynamique*. Ainsi est-il nécessaire et - avec les outils décrits ci-dessus - devenu possible de pronostiquer à court terme les changements futurs afin d'agir avant qu'ils ne se réalisent.

1 Einführung

1.1 Personenbahnhöfe

Die Personenbahnhöfe der Deutsche Bahn AG sind Gebäude, die sich durch ihre offene Struktur signifikant von anderen gängigen Bautypen wie Wohn-, Gewerbe-, Büro- und öffentliche Schul- und Theaterbauten unterscheiden.

Insbesondere an der Schnittstelle zu den Zügen sind gängige architektonische Lösungen wie Türen, Fenster und Windfänge zur Minderung von Zuglufterscheinungen und Energieverlusten nicht möglich. Die hohe Fluktuation der Reisenden¹, ihre Bewegung, die Größe der Bahnhofshallen sowie deren große Öffnungen nach außen lassen einen Großteil der aufgebrachten Wärmeenergie verpuffen.

Die Menge der Personenbahnhöfe ist ein sehr heterogenes Portfolio. Von den etwa 6.000 Bahnhöfen in der Bundesrepublik Deutschland besitzt annähernd die Hälfte ein Empfangsgebäude, die übrigen nur Bahnsteige mit entsprechenden Aufbauten.

Die Bahnhöfe unterscheiden sich sehr stark hinsichtlich

- ihrer Größe
- ihres Alters²
- ihres Sanierungsstandes
 - Ost-West-Gefälle
 - Haupt- und Nebenstrecken
- ihrer baulichen Struktur
 - offene und geschlossene Bahnhöfe
 - Kopf- und Durchgangsbahnhöfe
 - unter- und oberirdische sowie aufgeständerte Bahnhöfe
 - unterschiedliche Wegeführungen
 - unterschiedliche Bausubstanz der Empfangsgebäude
 - unterschiedliche Bahnsteigdächer oder -hallen

1.2 Energieeffizienz

Angesichts stetig steigender Energiepreise, beispielsweise durch die drohende Verknappung von Erdöl bei steigender Nachfrage in ehemaligen Schwellenländern vor allem in Ost- und Südasiens,

¹An einigen Stellen in der Arbeit werden bestimmte Personengruppen in der männlichen Form genannt. Dies geschieht aus Gründen der Vereinfachung und Übersichtlichkeit, gemeint sind aber weibliche *und* männliche Vertreter der jeweiligen Gruppe

²Erbauung in drei verschiedenen Jahrhunderten

sowie des bundesdeutschen Ausstiegs aus der nuklearen Energiegewinnung, der starken Wetterabhängigkeit alternativer und erneuerbarer Energiequellen sowie durch ökologische Gründe sind Wirtschaft, Industrie, Verkehr und Privathaushalte gezwungen, wirkungsvolle Energiesparmaßnahmen zu entwickeln und umzusetzen.

Allerdings darf durch solche Maßnahmen nicht die unternehmerische Funktionalität oder der Komfort eines Gebäudes gefährdet werden. Optimierung der Energieeffizienz bedeutet also die Minimierung des Energieeinsatzes bei gleichzeitiger Sicherstellung der Verfügbarkeit einer hundertprozentigen Funktionalität und bedarfsgerechter Komfortbedingungen.

Der Abschlußbericht INNOSEG 2007 [109], einem Gemeinschaftsprojekt der FH Erfurt und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, bringt die Herausforderung des Themas Energie folgendermaßen auf den Punkt:

„Der stetig ansteigende Bedarf an Energie für technische Prozesse impliziert mehrere Probleme:

- Vor allem den Klimawandel,
- soziale Probleme beim Zugang zu Energie und
- ein potentiell Risiko der Kernenergie.

Im Allgemeinen gibt es drei, zum Teil konkurrierende Ziele in der Energiewirtschaft: Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit.“

1.3 Funktionalität

Für den Energieverbrauch in einem Bahnhof wie auch in anderen komplexen Systemen sind sogenannte *Technische Anlagen* verantwortlich. Technische Anlagen werden mit Energie versorgt, z.B. mit Strom, Öl oder Gas. Der Energieverbrauch in einem Bahnhof ließe sich also theoretisch durch das vollständige Abschalten und Entfernen von technischen Anlagen minimieren. Allerdings würde ein Bahnhof unter diesen Umständen nicht mehr als solcher funktionieren. Um die Funktionalität eines Bahnhofs zu gewährleisten, muß zunächst geklärt werden, welche Funktionen das System „Bahnhof“ umfaßt.

Die grundlegende und ursprüngliche Aufgabe eines Personenbahnhofs besteht darin, eine bauliche Schnittstelle zwischen Menschen, d.h. Reisenden, und Zügen zu bilden.

Nach über 170 Jahren Eisenbahnbetrieb hat sich die Funktionalität von Bahnhöfen jedoch erweitert und diversifiziert.

1.3.1 Räumlich funktionale Gliederung

Die vielfältigen Funktionen eines Bahnhofes lassen sich grob einteilen in *Verkehrsstation* und *Vermarktungsbereich*. Unter

Verkehrsstation versteht man all die Flächen, die dazu dienen, daß Reisende in Züge ein-, aus ihnen aus- und umsteigen können. Dazu gehören vor allem Bahnsteige und Zugänge wie Unter- und Überführungen. Verkehrsstationen sind die in der historischen Entwicklungschronologie älteren Bereiche und gehören zu jedem aktiven Bahnhof.

Vermarktungsbereiche befinden sich nur in größeren Bahnhöfen. Hier nutzen Gewerbetreibende die hohe Dichte an Menschen sowie die Möglichkeit, in Deutschland auch an Sonntagen Produkte verkaufen zu können. In den Vermarktungsbereichen werden aber auch bahnspezifische Produkte angeboten, wie z.B. Fahrscheine, Informationen und Reservierungen.

In und zwischen diesen beiden dominierenden Funktionen gibt es vor allem *interne Verkehrsflächen* und *Wartebereiche*.

Interne Verkehrsflächen verbinden die einzelnen für die Besucher von Bahnhöfen relevanten Zonen. Die Bewegung der Abreisenden erfolgt von verschiedenen Varianten des Stadtverkehrs in den Bahnhof und führt durch Informations-, Gewerbe- und Wartebereiche hin zu den Bahnsteigen und Zügen. Ankommende Reisende bewegen sich gewöhnlich in entgegengesetzter Richtung, während Umsteiger sich von den Zügen und Bahnsteigen durch Warte-, Informations- und Gewerbezone zu anderen Bahnsteigen und Zügen bewegen.

Wartebereiche dienen dem Aufenthalt von Reisenden und Abholern beim Warten auf Züge.

ServicePoint ist ein Informationsstand der Deutschen Bahn, der zumeist in größeren Bahnhöfen anzutreffen ist. Die Mitarbeiter des ServicePoints verkaufen keine Fahrscheine, informieren aber sowohl über Zugverbindungen als auch über die lokale Infrastruktur vor Ort.

Klassische Vertreter der einzelnen Zonen sind in Abbildung 1.1 dargestellt.

Verkehrsstation			Verkehrsflächen	Wartebereich	Vermarktungs- bereich	Arbeitsplatz
Stadtverkehr	Informationen	Bahnsteige			Gewerbebereiche	
Zuwege Fußgänger	elektronische Fahrgastinfor- mationsanlagen	Regionalzüge	Zuwege, Zugänge zu anderen Bereichen	DB Lounge 1.Klasse, Wartebereich 2.Klasse	Reisezentrum, Fahrscheinautomaten	Mitarbeiter- kantine
Haltestellen Straßenbahn, Bus, U-Bahn	Sichtbeziehung zu Gleisen und Zügen	Fernzüge	Ein- und Ausgänge Empfangsgebäude	Halle in Empfangsgebäude	Verschiedene Geschäfte und Dienstleister, z.B.	Büros
Parkplätze Fahrrad, Privat-PKW, Mietwagen	Service Point	S-Bahn	Treppen, Fahrtreppen, Aufzüge Rampen	Schließfächer, Gepäckaufbewahrung	Bank, Wechselstube, Restaurant, Imbiß, Bäckerei, Supermarkt, Friseur, Zeitungskiosk, Buchhandlung, Post, Blumengeschäft, Marktstände etc.	Konferenz- und Veranstaltungs- räume
Taxistand	Fahrpläne		Bahnsteige, Querbahnsteige	Bahnsteige, Querbahnsteige		
	Werbung				Werbung	
						

Abbildung 1.1: Zonen und Funktionen in einem Personenbahnhof

1.3.2 Menschengruppen

Um die optimale Funktionalität eines Bahnhofs beschreiben zu können, ist es außerdem nötig, die verschiedenen Menschengruppen zu charakterisieren und quantifizieren, die tagtäglich Bahnhöfe nutzen, siehe dazu Abbildung 1.2.

Menschengruppen, Bahnstufennutzer					
Reisende abreisend, ankommend, umsteigend	Abholer	Nutzer Gewerbebereiche	Angestellte der Bahn		Staat
			Infrastruktur	Personenverkehr	
berufstätige Pendler	Familienangehörige und Freunde	Kunden	Personal Service Point	Personal im Reisezentrum	Polizei
Schüler und Studenten	Geschäftspartner	Angestellte	Instandhaltungs- und Wartungsdienste	Triebfahrzeug- und Zugführer	Bundes- grenzschutz
Geschäftsreisende	Hotellangestellte		Fahrdienstleiter und Durchsagen	Zugbegleiter	Sozialdienste Heilsarmee
Urlauber	Taxifahrer, Chauffeurdienste		3S-Zentrale Sicherheit, Service, Sauberkeit	Automaten-Scouts	
sonstige Reisende	Reiseleiter		Ansprechpartner auf Bahnsteigen	DB Lounge 1.Klasse	
			Technische Gebäudemanager		
					

Abbildung 1.2: Personengruppen in Bahnhöfen

Bahnhöfe sollen auch für folgende Personengruppen möglichst ohne fremde Hilfe funktionieren:

- Rollstuhlfahrer
- Blinde
- Menschen mit Kinderwagen oder viel Gepäck
- Alte und Gebrechliche

Je nach Bahnhofstyp und -größe unterscheidet sich die Zusammensetzung der jeweiligen Personengruppen. Die Gruppe der Reisenden umfaßt im Regelfall die meisten Menschen, hat aber individuell die geringste Verweildauer pro Bahnhof. Dafür betreten und benutzen sie pro Reise mindestens zwei unterschiedliche Bahnhöfe. Bahnangestellte und das Personal von externen Gewerbetreibenden haben hingegen die größte Verweildauer in einem Bahnhof, bleiben aber den ganzen Tag an einer Station.

1.3.3 Verkehrsfunktion Zugbetrieb

Bisher stand im Mittelpunkt die Betrachtung des Bahnhofs als Schnittstelle zwischen den Menschen in bestimmten Städten und den Zügen, welche in Bahnhöfen ankommen und abfahren. Auf der anderen Seite des Bahnhofs verkehren Züge auf Gleisen in Richtung anderer Städte, anderer Ballungszentren oder sogar anderer Länder. Ein Bahnhof berücksichtigt in seiner Funktionalität

also nicht nur die Gegebenheiten seines (Stand-) Ortes, sondern auch die Lage der umliegenden und überregionalen Städte und die dazwischenliegenden Bahntrassen.

1.3.4 Sicherheit

Ein letzter Teilaspekt der Funktionalität eines Bahnhofs ist die Sicherheit. Im Empfangsgebäude ist das Thema Sicherheit vergleichbar mit der baulichen Sicherheit anderer öffentlicher Gebäude mit großen Hallen. In der Nähe von Gleisen, Zügen und Hochspannungsleitungen, vor allem also auf Bahnsteigen, Treppen und Überführungen, gelten besondere Sicherheitsbestimmungen.

Die Gefahren durch den Eisenbahnbetrieb lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen:

- Technisches Versagen von Komponenten des Systems „Bahn“
- Fahrlässig oder mutwillig fehlerhaftes Verhalten von Dritten

Beispielhaft sind in Abbildung 1.3 einige Gefahren genannt, die vom Bahnbetrieb ausgehen könnten, wenn Sicherheitsvorschriften mißachtet werden.

Gefahren im Bahnbetrieb bei Mißachtung der Sicherheitsvorschriften						
Personenschaden im Gleis infolge			Zusammenprall von Zügen infolge	Elektrischer Schlag	Gefahren großer Menschenmengen	Gefahren in "dunklen Ecken" vor allem nachts
Dunkelheit, mangelhafter Beleuchtung	Ansaugen von Kinderwagen bei durchfahrenden Zügen	Selbstmordabsichten	Signalstörung	in den Fahrdrabt stürzende Leitern oder Leuchtmasten	Panik	Überfall
Gleisüberquerung und den langen Bremswegen von Zügen	Ansaugen von Personen, die sich jenseits der Sicherheitsmarkierung aufhalten	Drängerei und Schuberei von Reisenden auf dem Bahnsteig	fehlerhaftem Einstellen der Fahrstraßen	Herabreißen der Oberleitung durch Triebfahrzeuge	Diebstahl	Vergewaltigung
fehlerhafter Durchsage für durchfahrende Züge	plötzlich zusammenbrechender Personen	Fahrradfahrer oder Inlineskater auf den Bahnsteigen	Weichenstörung	Herunterschütten von Flüssigkeiten auf Fahrdrabt	Terroranschlag	
überhöhter Geschwindigkeit durchfahrender Züge	spielender Kinder, die sich der Gefahren nicht bewußt sind	Hetze und Rennen auf den Bahnsteigen	technischer Störung am Zug			
fehlerhafter Markierung für Blinde		betrunkener oder unter Drogen - einfluß stehender Personen				
Technisches Versagen von Komponenten des Systems "Bahn"						
Fahrlässiges oder mutwillig fehlerhaftes Verhalten von Dritten						

Abbildung 1.3: Sicherheitsrelevante Aspekte eines Bahnhofs

Das System „Bahnhof“ muß so beschaffen sein, daß beide Arten von Gefahrenquellen so weit wie möglich minimiert werden. Der technische Sicherheitsaspekt wird, als weitgehend geschlossenes System betrachtet, von der Deutschen Bahn auf mehrfach redundanten Sicherheitssystemen sowie mehr als 170 Jahre Erfahrung und technologischer Entwicklung basierend so weit optimiert, daß in den vergangenen Jahren in den etwa 6.000 Bahnhöfen und knapp 40.000 täglichen Zugfahrten weit weniger Unfälle passiert sind als vergleichsweise im Straßenverkehr.

Der öffentliche schienengebundene Verkehr ist jedoch ein offenes System. Mutwilliges oder fahrlässiges Fehlverhalten von Personen in Bahnhöfen in Kombination mit den Gefahren des Zugbetriebes können eine ungeheure Wirkung haben. Die Anzahl der am Bahnbetrieb teilnehmenden Personen ist so groß und ihr Verhalten derart vielfältig und unüberschaubar, daß das System Bahnhof gegen die daraus resultierenden Gefahren nur möglichst gut schützen, die Risiken aber nicht völlig ausschließen kann. Trotzdem sollte der Bahnhof einen optimalen Rahmen für die Abwehr von Gefahren bilden.

1.3.5 Arbeitsplatz

Da die Funktionen und Dienstleistungen in Bahnhöfen nicht automatisch erfolgen, sondern von einer Vielzahl von Beschäftigten in Bahnhöfen erarbeitet werden, besitzen größere Bahnhöfe die Funktion, Arbeitsplatz für alle im Bahnhof Beschäftigten zu sein.

1.3.6 Zusammenfassung

Die Funktionalität eines Personenbahnhofs läßt sich demnach wie folgt zusammenfassen:

- Verkehrsstation
 - Schnittstelle in Städten zwischen Menschen und Zügen
 - Information über Reisemöglichkeiten
 - aktuelle Ankunft und Abfahrt von Zügen
 - zukünftige Zugverbindungen
- Vermarktungsbereich, Konsum
- Interne Verkehrsfläche
 - Orientierung im Bahnhof
 - ungehinderte Personenbewegung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Richtungen
- Zugbetrieb unter überregionalen Gesichtspunkten
- Wartebereich
- Abwehr von Gefahren
- Arbeitsplatz
- Barrierefreiheit

1.3.7 Auslastung und Betrieb

Der Betrieb eines Bahnhofs ist ein dynamischer Prozeß, bei dem die Anzahl der Reisenden im Tagesverlauf und an verschiedenen Tagen stark schwankt. Allerdings finden die täglichen Auslastungsspitzen in etwa zu den selben Uhrzeiten statt. Abbildung 1.4 zeigt typische Tagesverläufe für Reisendenzahlen pro Stunde für Werk-, Wochenend- und Feiertage am Darmstädter Hbf[121].

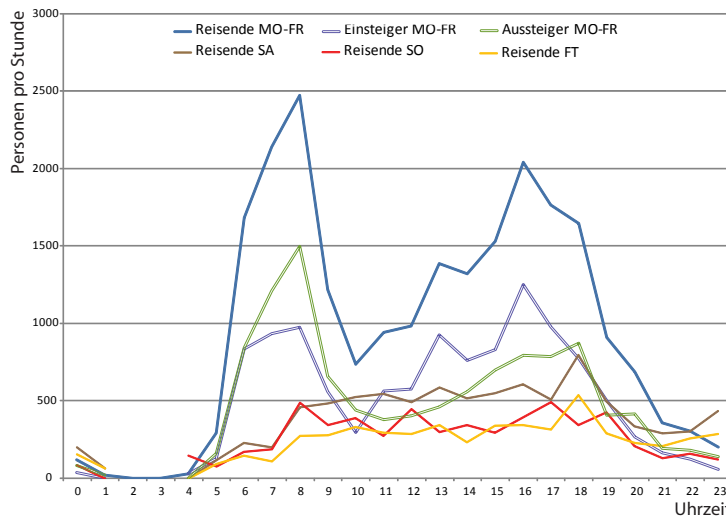


Abbildung 1.4: Typische Reisendenzahlen am Darmstädter Hbf

1.4 Komfort

Die Minimierung des Energieverbrauchs bei gleichzeitiger Sicherstellung aller notwendigen funktionalen Parameter entspricht im Großen und Ganzen der Optimierungsstrategie, wie sie in vielen kleinen Bahnhöfen bereits angewendet wird. In großen repräsentativen Bahnhöfen wird dem Aspekt Komfort eine größere Rolle beigemessen, sodaß hier das Streben nach Funktionalität und Komfort die Forderung nach Energiesparen häufig in den Hintergrund treten läßt.

1.4.1 Komfort für Reisende

Die Bedeutung von Komfort wächst mit den Ansprüchen der Reisenden und anderer potentieller Kunden, die in vielen anderen Lebensbereichen dank fortschreitender technischer Entwicklung ein hohes Niveau an Komfort gewohnt sind.

Im Kampf um Marktanteile im Dienstleistungssektor Mobilität spielt Komfort neben den Parametern Preis, Reisedauer und Flexibilität eine entscheidende Rolle.

Ein Blick auf Abbildung 1.5 führt vor Augen, daß die größte Konkurrenz für das „System Bahn“ in Deutschland und anderen Industrienationen der Privat-PKW ist.

Die Tatsache, daß der motorisierte Individualverkehr Marktanteile von etwa 79 Prozent, der schienengebundene Verkehr aber nur etwa 8 Prozent hält, rührt zum Teil daher, daß Reisende mit privaten Automobilen ihr Ziel direkt und „bis vor die Haustür“ erreichen können, während die Bahn nur Bahnhöfe miteinander verbindet³.

³Zum Vergleich: In den Staaten der Europäischen Union liegt der Marktanteil des schienengebundenen Personenverkehrs zwischen 5% und 10%, in den USA bei etwa 0,3%, in Japan bis zu 30%, vor 1970 sogar bei knapp 50%[88]

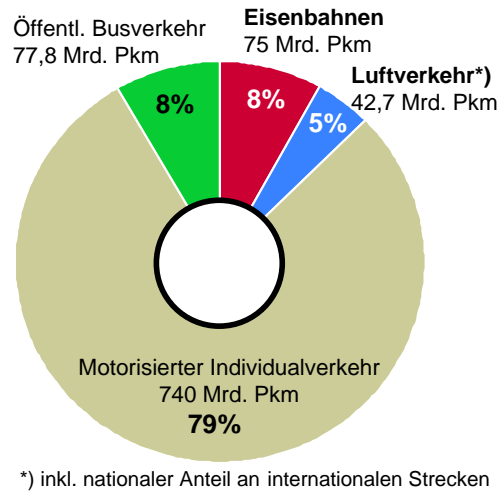


Abbildung 1.5: Anteile am deutschen Personenverkehr 2001 [85]

Dieses Manko wurde erkannt, sodaß sich die Bahn als ein über den reinen Schienenverkehr hinausgehender Mobilitätsdienstleister versteht und wie in Abbildung 1.6 zu sehen eine komplette Mobilitätskette anbietet.

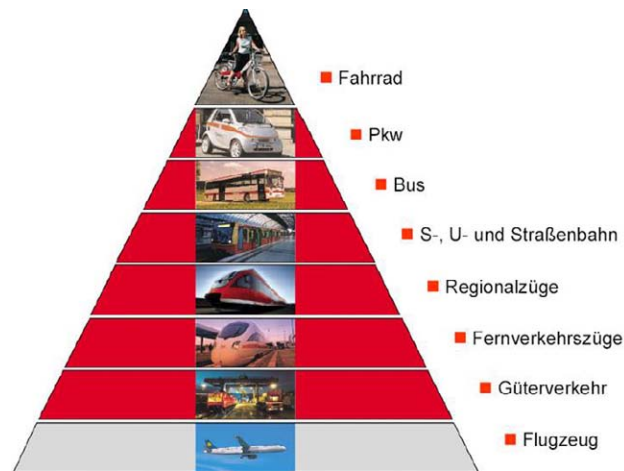


Abbildung 1.6: Mobilitätskette [84]

Eine Reisekette kann durch die Nutzung von Park'n'Ride-Parkplätzen oder Autozügen auch aus der Nutzung von öffentlichen *und* privaten Verkehrsmitteln bestehen.

In Abbildung 1.6 fällt auf, daß Personenbahnhöfe nach Auffassung der Autoren offensichtlich nicht zur Mobilitätskette gehören, mit der man gegen den individuellen Autoverkehr Marktanteile gewinnen möchte. Tatsächlich wurden in den Jahren 2002 - 2006 circa 6,2 Mrd Euro in die Modernisierung der Züge im Personenverkehr investiert [86]. 1,9 Mrd Euro entfallen auf 41 neue ICE-Züge, 200 Mio alleine bis Ende 2003 auf knapp 1.200 Fernverkehrswagen, 145 Lokomoti-

ven und 107 Steuerwagen. Im Regionalverkehr wurden 4,3 Mrd Euro investiert und das Durchschnittsalter des Fuhrparks um rund ein Drittel auf unter 15 Jahre gesenkt. Die Investitionen in Fahrbahntrassen und Signaltechnik betrugen 2003 sogar 69 Prozent der Gesamtinvestitionen [87].

Die Investitionen für Personenbahnhöfe konzentrieren sich vor allem auf die Erbauung und Modernisierung großer Bahnhöfe. Die kostenintensive Verbesserung von Komfort vor allem in großen repräsentativen Bahnhöfen scheint zunächst effizient zu sein. Schließlich werden diese Stationen von den meisten der jährlich 2,4 Mrd Bahnhofsbesuchern in Deutschland besucht, steigen hier die meisten der 1,7 Mrd Reisenden ein oder aus und halten dort die meisten Züge der täglich etwa 40.000 Zugfahrten. Das heißt, daß möglichst viele Menschen die komfortsteigernden Baumaßnahmen tatsächlich auch erleben und wahrnehmen.

De facto aber beginnen und beenden die meisten Reisenden ihre Gesamtreisekette nicht in den Stadtvierteln der Großstädte, in denen sich große moderne Bahnhofsbauten befinden. Die großen Bahnhöfe dienen zumeist nur zum Umsteigen in Fernzüge, da die Menschen im föderalistisch geprägten Deutschland nicht konzentriert in Metropolen, sondern dezentral verteilt in über 12.000 Dörfern und Städten [130] bzw. über 4.500 Gemeinden [131] leben. Die für Deutschland typische dezentralisierte Siedlungsstruktur erfordert in der Regel häufiges Umsteigen bei der Benutzung öffentlicher Verkehrsmittel, ein Grund, weswegen der motorisierte Individualverkehr einen sehr hohen Marktanteil im Personenverkehr besitzt.

Selbst wenn das Angebot des Schienenverkehrs in puncto Preis und Gesamtreisedauer, Komfort in Zügen und einigen wenigen Prestige-Bahnhöfen mit der Konkurrenz, vertreten durch Auto oder Flugzeug, mithalten kann, so ist es doch der fehlende Komfort der großen Masse an Bahnhöfen, der potentielle Kunden dazu bringt, sich letztendlich gegen eine Reise mit der Bahn zu entscheiden.

Aufenthalte in Bahnhöfen sind aus folgenden Gründen signifikante Bestandteile von Reiseketten:

- Warten auf Züge, besonders bei
 - Verspätungen
 - ausgedünntem Fahrplan nachts oder feiertags
 - Kälte, Hitze oder Niederschlag
- Umstieg
- Warten auf Abholer

1.4.2 Komfort für Personal

Auch in Hinblick auf das in Bahnhöfen beschäftigte Personal ist die Vorhaltung von Komfort ein wichtiger Gesichtspunkt. Zum einen beeinflußt Komfort die Motivation der Mitarbeiter. Personen, die in einer unkomfortablen Umgebung arbeiten müssen, fühlen sich leicht von ihren Arbeitgebern im Stich gelassen und kündigen innerlich, auch wenn sie noch regelmäßig zur Arbeit erscheinen und „Dienst nach Vorschrift“ ohne jegliches persönliches Engagement betreiben.

Diskomfort sorgt darüber hinaus auch für einen erhöhten Krankenstand, was weder im Interesse der Arbeitnehmer noch der Arbeitgeber liegt und ernstzunehmende wirtschaftliche Schäden erzeugt[2].

1.5 Energieverbrauch im System „Bahn“

Die Deutsche Bahn AG, von den deutschen Finanzbehörden als „energieintensives“ Unternehmen eingestuft, wendet einen Großteil ihrer Einnahmen für die Beschaffung von Energie auf. In den Kosten ist nicht nur der reine Energiepreis enthalten, sondern je nach Energieträger auch eine Vielzahl von Steuern und Abgaben, wie z.B. durch das Erneuerbare Energien Gesetz, das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, als Ökosteuer, als Konzessionsabgabe, als Netznutzungsentgelt oder Zertifikatspreis im CO_2 -Emissionshandel. Eine Verminderung des Verbrauchs elektrischer Energie würde also auch die Steuer- und Abgabenlast des Unternehmens deutlich senken.

Neben den ökonomischen Gründen, die für die Reduzierung des Energieverbrauchs bei der Deutschen Bahn AG und anderen Bahnunternehmen sprechen, gibt es noch weitere Argumente:

- Interne Motive [37]
 - Klimaschutzprogramm 2005: Senkung des Energieverbrauchs um 25%
 - Klimaschutzprogramm 2020: Senkung des Energieverbrauchs um weitere 15%
 - Öffentliches Image als ökologischer Verkehrsträger
- Politische Zwänge
 - Protokoll von Kyoto 1997 (Reduzierung CO_2 -Emission um 25%)
 - Richtlinie der Europäischen Union zur Endenergieeffizienz
 - Verhandlungen mit dem Eigentümer, die Bundesregierung

Der dominierende Energieträger im System „Bahn“ ist die elektrische Energie. Abgesehen davon wird im Bereich der Traktion Diesel und eine vernachlässigbar kleine Menge an Kohle für Museumszüge eingesetzt. Bei der Klimatisierung von Gebäuden kommen neben Strom auch Gas, Heizöl und Fernwärme zum Einsatz. Bahnstrom unterscheidet sich von dem gängigen Haushaltsstrom durch seine besondere Frequenz von 16,7Hz. Insgesamt kommen folgende drei verschiedene Formen der elektrischen Energie bei der Deutschen Bahn zum Einsatz:

16,7Hz-Wechselstrom wird vorwiegend für die Traktion von Zügen und Weichenheizung verwendet. Schulungen für „energiesparendes“ Zugfahren sowie technische Lösungen für die Rückspeisung von elektrischer Energie beim Bremsen von Zügen werden bei der Deutschen Bahn AG bereits eingesetzt und an dieser Stelle nicht näher diskutiert.

50Hz-Wechselstrom wird für den Betrieb stationärer Anlagen verwendet, vor allem in Bahnhöfen, Stellwerken, Betriebszentralen und Bürobauten, aber auch Bahnübergängen und Leit- und Sicherungstechnik.

Gleichstrom wird historisch bedingt als Traktionsstrom sowie für den Betrieb stationärer Anlagen in den S-Bahn-Netzen Hamburg und Berlin eingesetzt.

Abbildung 1.7 zeigt die Entwicklung des Primärenergiebedarfs der Deutschen Bahn von 1990 bis 1997. Der Rückgang des Verbrauchs der stationären Energie seit 1990 übertrifft zwar bereits die gesteckten Ziele, hat aber folgende zwei Ursachen:

1. Stilllegung vieler Bahnbetriebsgebäude, vor allem in Ostdeutschland
2. Überführung vieler Gebäuden in eigenständige Gesellschaften

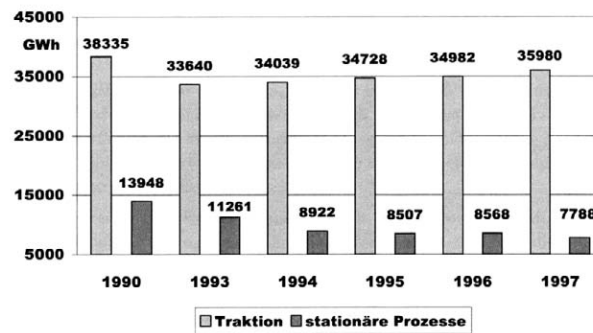


Abbildung 1.7: Einsatz von Primärenergie bei der DB AG[37]

Von einer spezifischen Senkung des stationären Energieverbrauchs kann also nicht die Rede sein[37]. Die prozentuale Aufteilung des Einsatzes von Primärenergie für stationäre Zwecke zeigt Abbildung 1.8.

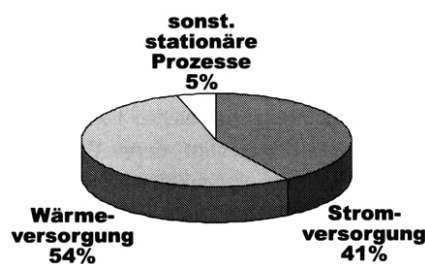


Abbildung 1.8: Einsatz von Primärenergie für stationäre Prozesse[37]

Im Jahr 1997 betrug der Primärenergieeinsatz zur Erzeugung von 1.025 GWh elektrischer Energie 3.000 GWh. Demgegenüber stand ein Primärenergieeinsatz für Wärmeversorgung von 4.200 GWh. Davon entfielen 35% auf Heizöl, 33% auf Erdgas, 27% auf Fernwärme und 5% auf feste Brennstoffe. Der Energieverbrauch betrug 1993 10% des gesamten Unternehmensbudgets[40]. Aufgrund der in der Zwischenzeit neu hinzugekommenen Energiesteuern und -abgaben und der stark gestiegenen Energiepreise liegt der Anteil heute wesentlich höher.

1.6 Ziel der Arbeit

Der öffentliche Verkehr ist ein energetisch effizientes Verkehrsmittel, vorausgesetzt, die Auslastung ist ausreichend hoch. Die Marktanteile des öffentlichen, vor allem aber des schienengebundenen Verkehrs in Deutschland und anderen europäischen Staaten sind jedoch gering gegenüber denen des motorisierten Individualverkehrs. Ein zentrales Unterscheidungsmerkmal beider Verkehrsformen ist die Tatsache, daß Fahrten mit einem Privatfahrzeug „Tür-zu-Tür“-Verbindungen sind, während Reisen mit dem öffentlichen Verkehr durch Umstiege und Fahrzeugwechsel geprägt sind. Der dadurch entstehende Zeitverlust läßt sich durch höhere Spitzengeschwindigkeiten, weniger

Staus und einer höheren Nutzbarkeit der Reisezeit kompensieren⁴. Ziel dieser Arbeit ist es, belastbare Strategien dafür zu finden, dem durch den Umstieg und das Warten auf öffentliche Verkehrsmittel drohenden *Komfortverlust* mit einem minimalen Einsatz von Energie entgegenzuwirken.

Die Akzeptanz des öffentlichen Personenverkehrs soll erhöht werden, indem Gesamtreiseketten mit dem öffentlichen Verkehr auf einem gleichmäßig hohen Niveau an Komfort und Funktionalität unter minimalem Einsatz an Energie angeboten werden können. Die Nutzung der Verkehrsdrehscheiben des öffentlichen Verkehrs, im Falle dieser Arbeit Personenbahnhöfe, soll also mindestens genauso behaglich, ergonomisch und sicher⁵ sein wie die Nutzung der eigentlichen Fortbewegungsmittel, und dabei dem Effizienzaspekt des öffentlichen Verkehrs Rechnung tragen.

Insbesondere an der Schnittstelle Gleis – Bahnsteig – Empfangshalle liegt ein großes Einsparungspotential verborgen. Je nach Struktur des Bahnhofs werden diese Verbindungen durch Rolltreppen, Treppen, Aufzüge, ebene Durchgänge, Brücken und Unterführungen realisiert. Ein weiterer neuralgischer Punkt sind die offenen Orte, an denen Menschen stationär arbeiten und dadurch ein noch größeres Wärme- oder Kühlebedürfnis haben als die sich bewegenden Reisenden. Hierzu gehören die Mitarbeiter im „ServicePoint“ sowie Händler der Imbiß- und Zeitungsstände.

Eine Besonderheit der Verkehrsstation Bahnhof liegt in dem hohen Bedarf an elektrischer Energie, verursacht durch technische Anlagen wie Sicherheitsbeleuchtung, Fahrtreppen, Aufzüge, beleuchtete Wegeleitsysteme und Fahrgastinformationsanlagen, Lüftungsanlagen und Heizstrahler. Diese benötigen einen besonders hohen Einsatz an Primärenergie.

Das Ziel der Arbeit liegt darin, die bauliche Struktur und den Betrieb des Typus Personenbahnhof soweit zu optimieren, daß der Einsatz energieintensiver technischer Anlagen auf ein notwendiges und sinnvolles Mindestmaß reduziert und gleichzeitig das für den Eisenbahnbetrieb und dessen Kunden notwendige Niveau an Funktionalität und Komfort erreicht werden kann.

Energieeffizienz bedeutet also, daß je nach Bahnhofstyp und -größe Energieverbrauch, Funktionalität und Komfort in einem optimalen Verhältnis zueinander stehen.

Aufgrund der Komplexität der Bahnhöfe sollen verschiedene numerische Werkzeuge verwendet, getestet und neu entwickelt werden, mit denen die Aufgabenstellung *quantitativ* bewältigt werden kann. Die Existenz von vielen Bahnhofsvarianten im Bestand legt nahe, auch in den Modellen mit alternativen Varianten zu arbeiten. Allerdings ist es nicht möglich, mit Hilfe eines einzelnen Algorithmus *alle* relevanten, sich wechselseitig beeinflussenden Parameter *automatisch* zu optimieren. Vielmehr finden verschiedene numerische Modelle Anwendung, die jeweils einen Teilaspekt des Themenspektrums beleuchten und argumentativ in dieser Arbeit verknüpft werden.

Im Verlauf der Arbeit sollen somit vier zentrale Fragestellungen beantwortet werden:

1. Welche sind die für die Energieeffizienz, thermischen Komfort und Funktionalität eines Personenbahnhofes relevanten / kritischen Größen?
2. Inwieweit lassen sich diese Größen mit Hilfe von quantitativ statistischen und numerischen Simulationsmethoden optimieren?

⁴Diese Gesichtspunkte sind allerdings nicht Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit

⁵Zur Beschreibung und Definition dieser Begriffe siehe Abschnitte 1.3 und 3.1

3. Welche allgemeine Aussagen über die Optimierung der Energieeffizienz von Personenbahnhöfen lassen sich aufgrund der Ergebnisse der beispielhaften Analysen in dieser Arbeit treffen?
4. Welche Fragen bleiben offen, wo sollten verallgemeinernde oder vereinfachende Annahmen verifiziert werden mit Hilfe von
 - Erhebungen / Messungen und weiteren quantitativen Modellen
 - Simulationsmodellen, die die in dieser Arbeit dargestellten numerischen Werkzeuge vernetzen
 - Individuellen Untersuchungen einzelner Bahnhöfe

Die drei in ein optimales Gleichgewicht zu bringenden Zielgrößen mit ihren wichtigsten Parametern und die in dieser Arbeit dazu verwendeten Modelle werden schematisch in Abbildung 1.9 dargestellt.

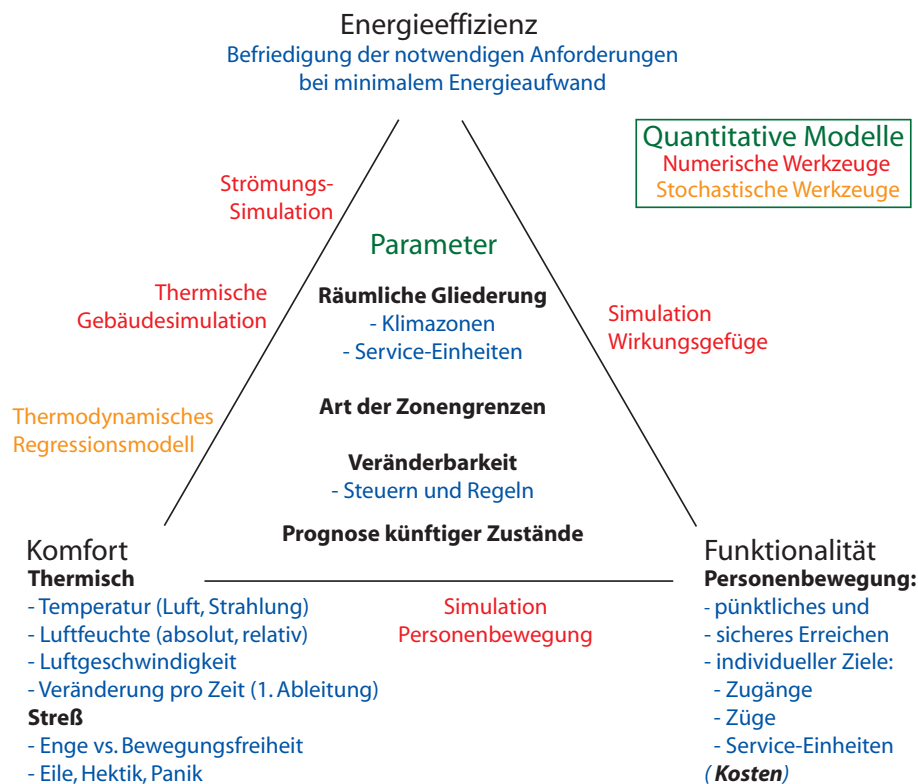


Abbildung 1.9: Untersuchung von Energieeffizienz, Komfort und Funktionalität in Bahnhöfen

Nach einer Strukturanalyse von Bahnhöfen in Kapitel 2 und einer Übersicht über den Stand der Forschung in den relevanten Themengebieten in Kapitel 3 wird in Kapitel 4 die stochastische Modellierung von thermodynamischen Größen in Bahnhöfen dargestellt. In den darauf folgenden Kapiteln 5, 6 und 7 werden basierend auf den bis dahin gewonnenen Informationen numerische Simulationen des Gesamtsystems Bahnhof, der thermodynamischen und strömungsmechanischen Vorgänge und der Funktionalität hinsichtlich Bewegungsfreiheit und thermischem Komfort beschrieben und analysiert.

2 Strukturanalyse

2.1 Struktur von Bahnhöfen

Die energetische Besonderheit von Bahnhöfen gegenüber anderen Bauwerken wie Wohnhäuser und Bürogebäude ist vor allem auf die besondere Funktionalität und damit einhergehend auf die besondere architektonische Struktur zurückzuführen. Die funktionellen Eigenschaften sind bereits in Abschnitt 1.3 ausgiebig erläutert worden. Daher soll an dieser Stelle die bauliche Struktur von Bahnhöfen näher betrachtet werden.

Bahnhöfe besitzen trotz ihrer sehr ähnlichen Aufgaben und Funktionen untereinander zum Teil sehr unterschiedliche bauliche Strukturen. Das hat zum einen mit den unterschiedlichen Epochen, geographischen Regionen und damit Modeerscheinungen zu tun, zum anderen mit den sehr unterschiedlichen Größen und Verkehrsaufkommen. Auch wenn es keine abgrenzbaren Gruppen von kleinen und großen Bahnhöfen gibt, da der Größenverlauf beinahe stetig ist, sollen doch einige Eigenschaften typisch großer und kleiner Bahnhöfe genannt werden:

Eigenschaft	je größer desto	je kleiner desto
Anzahl	weniger	mehr
Heterogenität	stärker	geringer
Verkehr	mehr	weniger
Umstiege	mehr	weniger
Komfortzonen	mehr	weniger
Geschäfte	mehr	weniger

Es gibt also eine geringe Anzahl großer Bahnhöfe, die baustrukturell sehr unterschiedlich sind, während eine große Anzahl kleiner Bahnhöfe größere Ähnlichkeiten untereinander aufweisen. Das legt den Schluß nahe, die Energieeffizienz für Großbahnhöfe individuell optimieren zu müssen, während es für kleine Haltepunkte zweckmäßiger ist, Standardrezepte zu finden, die sich auf alle Standorte anwenden lassen.

Eine besondere Rolle spielen S-Bahnhöfe, die sich in Ballungszentren befinden und ein hohes Verkehrsaufkommen besitzen, deren bauliche Anlagen jedoch relativ klein sind.

2.1.1 Typisierung anhand der räumlichen Struktur

Variationen der räumlichen Anordnung der Baukörper, Gleisanlagen und Verkehrswege gibt es sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen.

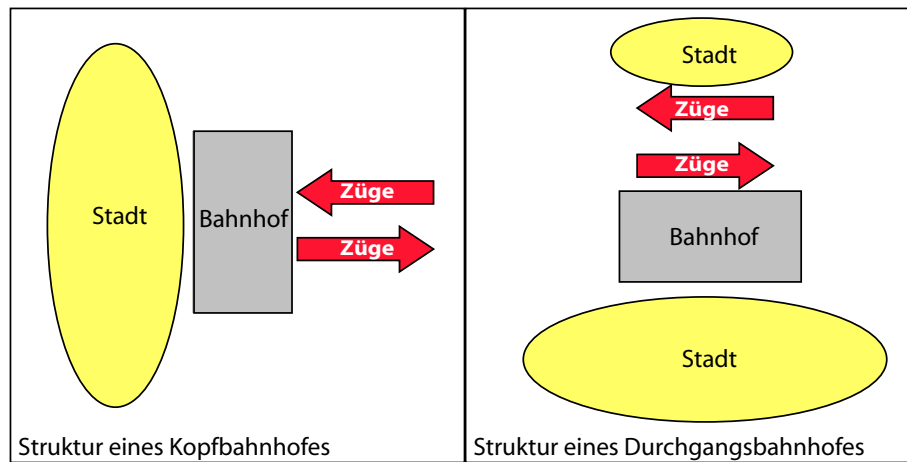


Abbildung 2.1: Kopf- und Durchgangsbahnhöfe

Die Grundrissvarianten, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, ergeben sich in der Regel aus städtebaulichen Aspekten: Kopfbahnhöfe können in unmittelbarer Nähe der Innenstädte liegen, ohne diese durch eine durchgehende Bahnlinie zu zerschneiden. Allerdings haben Kopfbahnhöfe negative Auswirkungen auf den Bahnverkehr: Die Züge fahren über dieselben Gleise in die Bahnhöfe ein und aus, weshalb nachfolgende Züge häufig warten müssen. Des weiteren sind bei den Ein- und Ausfahrten eine größere Anzahl Weichenüberfahrten nötig, und die Streckenführung macht einen großen Bogen vor dem Bahnhof, was ebenfalls Zeit kostet. Die Richtungsänderung der Züge kostet seit der Einführung von Trieb- und Wendezügen mit Steuerwagen keine zusätzliche Zeit, sofern auch ein Tausch der Triebfahrzeugführer stattfindet.

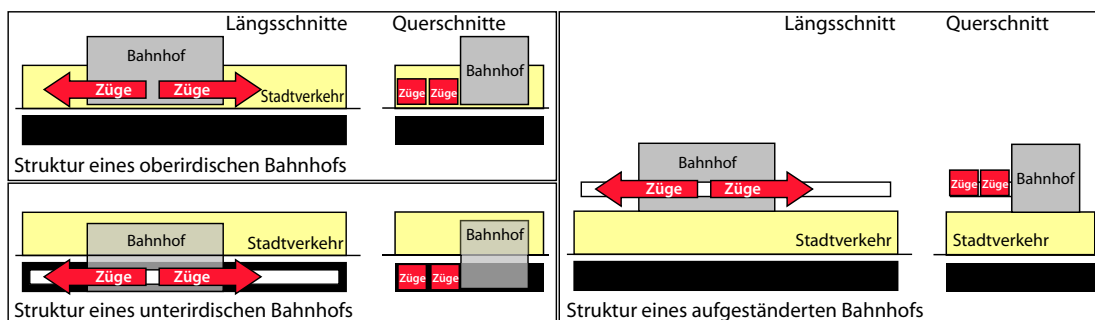


Abbildung 2.2: Vertikale Strukturvarianten

Die vertikale Struktur eines Bahnhofs hängt sehr stark von seiner Funktion und Lage ab. Die überwiegende Anzahl der Bahnhöfe mit Nah- und Fernverkehrsanschluß hat sowohl oberirdisch liegende Empfangsgebäude sowie Bahnsteige und Gleise. Eine Ausnahme spielen die S-Bahnhöfe in den Großstädten: Da hier aus städtebaulichen Gründen eine oberirdische Gleisführung inakzeptabel wäre, sind diese Bahnhöfe in der Regel unterirdisch, zum Teil aber auch aufgeständert. Ein drittes strukturelles Merkmal ist die Lage der verschiedenen Ebenen der Gebäudehülle und

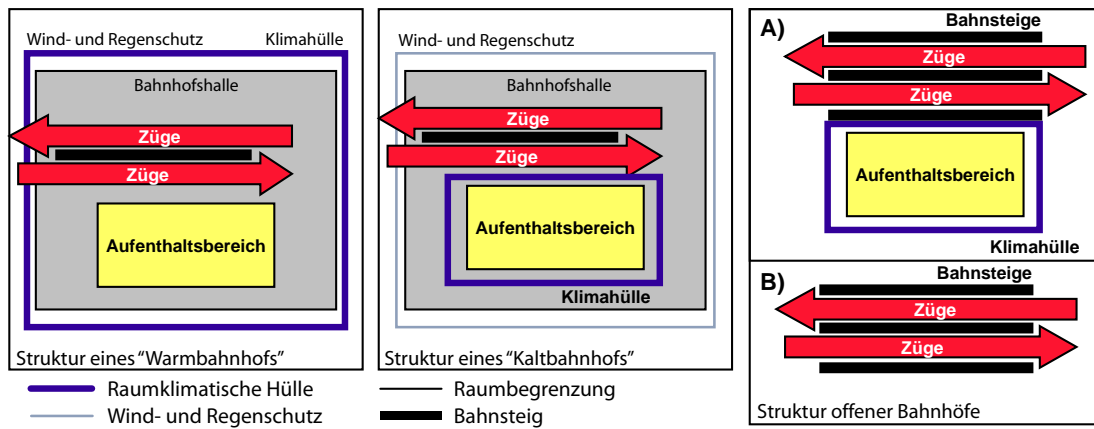


Abbildung 2.3: Varianten der Gebäudezonierung und -hülle

die damit verbundene Ausbildung von raumklimatischen Zonen. Anders als bei „klassischen“ Gebäudetypen, bei denen die Trennung zwischen innen und außen vollständig in einer oder maximal zwei Fassadenebenen liegt, verläuft bei Bahnhöfen die Trennung in mehreren Stufen, sodaß Räume entstehen, die unter verschiedenen Gesichtspunkten teilweise dem Innen- und teilweise dem Außenraum zugeordnet werden können. Insbesondere der Witterungsschutz und die klimatische Grenze verlaufen nicht unbedingt in einer Ebene. Die Wahl der Fassadenebenen hat einen großen Einfluß auf die thermische Behaglichkeit in den betreffenden Gebäudezonen. Sie ist daher auch ein Indikator dafür, bei welchen Bahnhöfen in der Vergangenheit ein großer Wert auf Komfort für Reisende und Mitarbeiter gelegt wurde.

Von den in Abbildung 2.3 dargestellten Strukturen ist die Variante in der Mitte mit der nicht

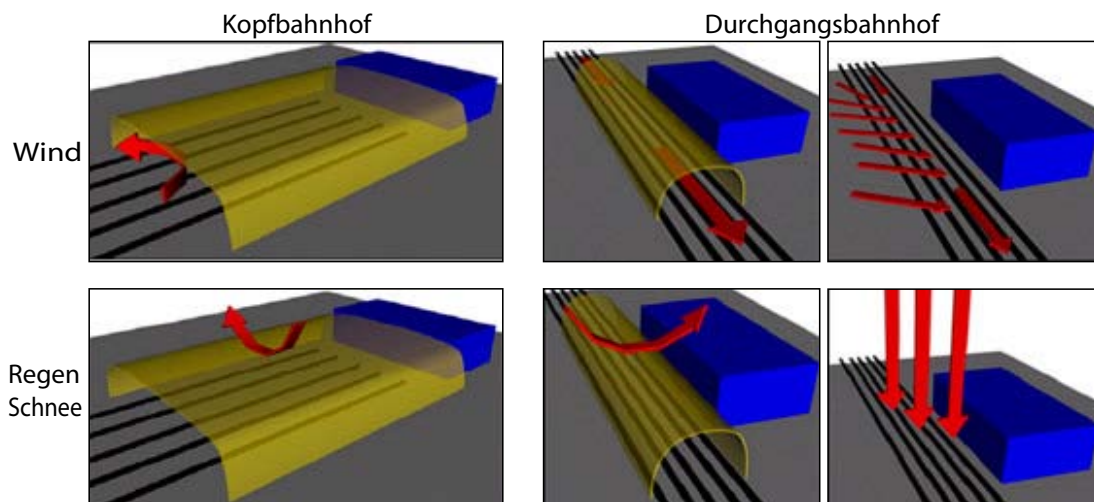


Abbildung 2.4: Auswirkungen von Wind und Niederschlag

offiziellen Bezeichnung „Kaltbahnhof“ am häufigsten bei großen, verkehrsreichen und prestige-trächtigen Bahnhöfen verbreitet. Der gesamte Bahnhof befindet sich in einer Hülle, die gegen Wind und Niederschlag schützt. Ein temperiertes Innenraumklima besitzen allerdings nur bestimmte Bereiche im Empfangsgebäude. Die beiden Strukturen in derselben Abbildung rechts sind typisch für kleine Bahnhöfe (A) und sehr kleine Haltepunkte (B). Die Bahnsteige befinden sich im Außenbereich. Im Fall (A) existiert neben den Verkehrsanlagen ein Empfangsgebäude, welches beispielsweise eine Gastwirtschaft und Fahrscheinautomaten enthält, aber keine direkte bauliche Beziehung zu den Bahnsteigen besitzt. Die Variante links „Warmbahnhof“ ist eher theoretischer Natur, kommt aber in seltenen Fällen zumindest ansatzweise vor. Bei diesem Bahnhofstyp fahren die Züge durch die Klimahülle in einen echten Innenraum ein und wieder heraus. Problematisch ist natürlich die Gestaltung der „Türen“, die aus Gründen der Verkehrssicherheit nicht aus einem massiven Feststoff bestehen können. Mit gewissen Einschränkungen lassen sich die Bahnhöfe Frankfurt Flughafen Fernbahnhof und Regionalbahnhof, der Bahnhof Berlin Zoo und einige unterdische S-Bahnhöfe zu diesen Gattung zählen.

2.1.2 Auswirkungen des Strukturtyps auf den Komfort

Zunächst werden qualitativ die Auswirkungen der unterschiedlichen Strukturvarianten auf Energieverbrauch, Komfort und Funktionalität diskutiert.

Kopf- und Durchgangsbahnhöfe

Der Vorteil von Kopfbahnhöfen liegt vor allem auf Seiten der Schnittstelle zum Stadtverkehr: Zum einen wird die Innenstadt nicht durch eine durchgehende Bahntrasse durchschnitten, zum anderen können die Wegeführungen im Bahnhof horizontal über den Querbahnsteig verlaufen. Über- und Unterführungen, Aufzüge und Fahrtreppen sind nicht nötig. Demgegenüber steht ein großer Nachteil im Zugbetrieb¹. Ein weiterer Nachteil für manche Reisende ist die Richtungsänderung der Züge, da sie unter Beibehaltung ihres Sitzplatzes die Fahrtrichtung ändern.

Wie aus Abbildung 2.4 hervorgeht, haben Kopfbahnhöfe mit Empfangsgebäuden ein geringeres Zugluftisiko auf den Bahnsteigen als Durchgangsbahnhöfe.

Ober- und unterirdische Bahnhofsanlagen

Die am häufigsten vorkommende vertikale Struktur ist der oberirdische Bahnhof. Er ist optimal für den Bahnbetrieb und die relativ gesehen kostengünstigste Variante. Im Falle eines Durchgangsbahnhofes kommen aber die bereits erwähnten Nachteile zum Tragen: die städtebauliche Trennung von Stadtvierteln sowie die Bewegungsabläufe im Bahnhof. Wenn Empfangsgebäude und Bahnsteige nebeneinander liegen, sind zum Erreichen der Züge mindestens zwei vertikale Bewegungsabläufe nötig.

Unterirdische Bahnhöfe stellen optimale Bedingungen für den Bahnbetrieb und für die Bewegungsabläufe der Reisenden im Bahnhof dar. Für Ankommende und Abreisende ist jeweils nur

¹siehe Abschnitt 2.1.1

ein vertikaler Bewegungsablauf nötig. Nachteilig wirken sich die erhöhten Baukosten bei der Ausschachtung der Tunnelanlagen aus sowie die erhöhten Anforderungen an den Brandschutz und die Notwendigkeit der permanenten Sicherheitsbeleuchtung und -belüftung. Auch städtebauliche Aspekte sprechen für unterirdische Bahnanlagen. Aus diesem Grund soll der Kopfbahnhof Stuttgart Hbf in einen unterirdischen Durchgangsbahnhof umgebaut werden.

Gebäudehüllen und -zonen

Die beiden geschlossenen Bahnhofstypen in der Mitte und links in Abbildung 2.3 sind als Untergruppe aufzufassen, da sie den gesamten Bahnhof in eine Hülle einhausen, wodurch alle Bahnhofszonen grundsätzlich dem Innenraum zugeordnet werden können. Dies wird erkauft mit einem erhöhten Aufwand an Beleuchtungsenergie bei massiven Baumaterialien oder Aufwand an Energie für Reinigung, Wartung und Instandhaltung bei transparenten Fassaden.

Der „Warmbahnhof“ soll besonders behaglich für Kunden sein und den Krankheitsstand der Mitarbeiter senken. Klima- und Witterungsgrenze liegen wie bei Wohn- und Bürobauten in derselben Ebene. Problematisch ist der Energieverbrauch. Zum einen muß ein enormes Luftvolumen im Winter geheizt werden, zum anderen verbrauchen die Luftschleusen an den Zugängen der Züge viel Energie. Dafür würde keine zusätzliche Energie für ServicePoints, Informationsschalter oder Geschäftslokale benötigt werden. Ob diese scheinbar offensichtlichen Vor- und Nachteile auch wirklich zutreffen, wird in Kapitel 6 mit Hilfe von Simulationen untersucht.

Der „Kaltbahnhof“ schützt vor Witterungseinflüssen, hat aber in den außen liegenden Zonen möglicherweise Außentemperaturen. Da es keine Luftschleusen an den Einfahrbereichen der Züge gibt, ist abhängig von der Gebäudegeometrie auch mit Zuglufterscheinungen zu rechnen.

Die offenen Bahnhöfe zeichnen sich durch die geringsten Bau- und Betriebskosten aus. Allerdings sind bei einem Haltepunkt ohne Empfangsgebäude alle Zonen klimatisch dem Außenbereich zuzuordnen. Bei offenen Bahnhöfen mit Empfangsgebäude existiert zwar die Möglichkeit, längere Wartezeiten in einem geschützten Bereich zu verbringen. Allerdings treten im Hochsommer und im Winter für die Reisenden unangenehme Temperaturwechsel ein, wenn sie folgende Zonen nacheinander aufsuchen:

Ort	Klima
Privat-PKW	gemäßigter Innenraum
Weg zum Empfangsgebäude	heißer oder kalter Außenraum
Warten im Empfangsgebäude ²	gemäßigter Innenraum
Weg zum Bahnsteig und Zug	heißer oder kalter Außenraum
Fahrt im Zug	klimatisierter Innenraum

Die Auswirkungen sowie Vor- und Nachteile der einzelnen strukturellen Parameter werden in Abbildung 2.5 zusammengefaßt. Offene Bahnhöfe benötigen am wenigsten Energie für Beleuchtung. Bei geschlossenen Bahnhöfen fallen je nach Dachtyp Kosten für künstliche Beleuchtung oder für

²Kurze Warteperioden sind aufgrund der geringen Entfernung zum Zug nur auf den im Außenraum liegenden Bahnsteigen möglich.

die Reinigung und Wartung von transparenten Dächern an. Bezüglich des Energieverbrauchs für Fördertechnik sind Kopfbahnhöfe am günstigsten, da nur sie einen gefahrlosen höhengleichen Zugang zu den Gleisen bieten. In aufgeständerten oder unterirdischen Bahnhöfen müssen Reisende und ihr Gepäck mindestens einen Ebenenwechsel vornehmen, in Bahnhöfen, bei denen die Gleise auf durchgehend gleicher Höhe neben dem Empfangsgebäude liegen, sind abgesehen vom Hausbahnsteig mindestens zwei vertikale Bewegungsvorgänge nötig. Der Bahnbetrieb läßt sich am einfachsten, schnellsten und sichersten in Durchgangsbahnhöfen abwickeln.

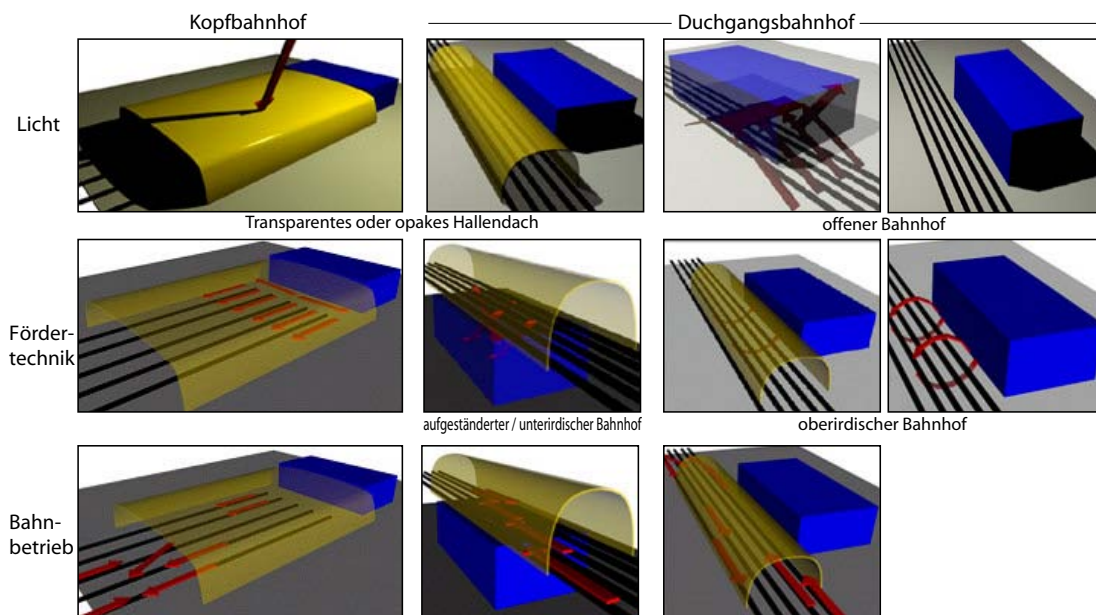


Abbildung 2.5: Auswirkungen der Gebäudestruktur auf Energieverbrauch und Funktionalität

Wegeführung

Die Art der Wegeführung ist entscheidend dafür, ob Energie für den Betrieb von Aufzügen, Fahrtreppen und eventuell sogar Heizungen zum Schutz gegen Vereisung gebraucht wird. Ihre Qualität ist aber auch für die Funktionalität der Verkehrsstation verantwortlich, ob und wie schnell Reisende ihre Züge erreichen, ob Rollstuhlfahrer ohne fremde Hilfe auf dem Bahnhof zurecht kommen, ob Reisende sich im Bahnhof sicher fühlen und ob zusätzliche Energie für Tunnelbeleuchtung nötig ist. In Abbildung 2.6 sind die vier häufigsten Arten der Wegeführung aufgeführt³.

Über- und Unterführungen sind dann nötig, wenn Empfangsgebäude und Bahnsteige höhengleich nebeneinanderliegen und die Gleise durchgängig sind. Ihnen ist gemein, daß sie den größten Aufwand an Überwindung von Höhendifferenz verursachen, da die Reisenden auf dem Weg zum Zug mindestens einmal eine Ebene nach oben und mindestens eine nach unten steigen müssen.

³In der Realität gibt es aber auch Mischformen, wie z.B. beim Darmstädter Hauptbahnhof, siehe Abschnitt 6.1.1

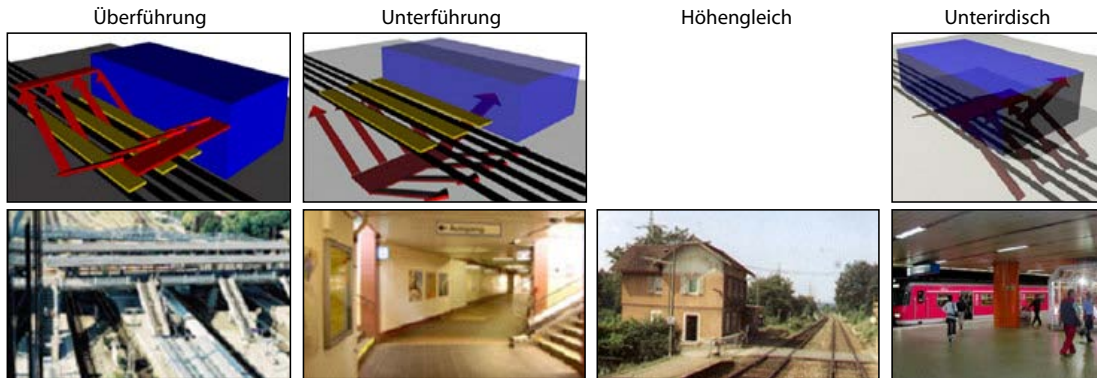


Abbildung 2.6: Varianten der Wegführung zwischen Empfangsgebäude und Bahnsteigen

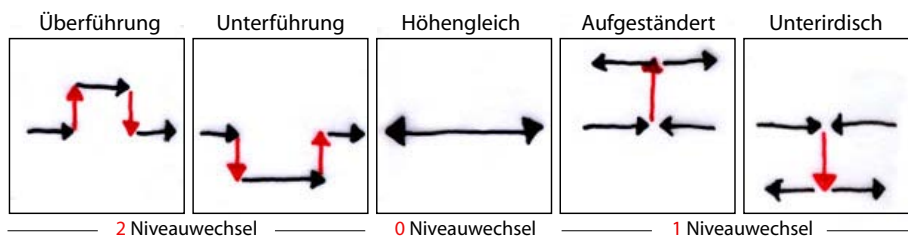


Abbildung 2.7: Aufwand für den Wechsel des Höhenniveaus in Abhängigkeit der Wegführung

Gegenüber der höhengleichen Wegführung in Durchgangsbahnhöfen bieten beide eine relativ geringe Unfallgefahr und haben verschiedene Vor- und Nachteile, siehe Tabelle 2.1.

Bei höhengleichen Übergängen werden keine Förderanlagen benötigt, sondern nur Beleuchtungsanlagen und Signalanlagen im Falle von Durchgangsbahnhöfen. Aufgrund der hohen Unfallgefahr, vor allem bei Eisglätte, ist diese Form der Wegführung nur bei sehr kleinen Bahnhöfen mit wenig und langsam fahrendem Zugverkehr anzutreffen. Eine höhengleiche Wegführung in Kopfbahnhöfen ist dagegen völlig unkritisch.

Unterirdische Stationen haben bezüglich Wegführung die in Tabelle 2.2 dargestellte Bilanz.

Abbildung 2.8 zeigt unterschiedliche architektonische Elemente, die Reisenden dazu dienen, auf

⁴da mit Sicherheitsabstand über Oberleitung hinweg



Abbildung 2.8: Technische und bauliche Anlagen für Ebenenwechsel in Bahnhöfen

Kriterium	Überführung	Unterführung
Höhendifferenz	sehr hoch ⁴	gering
Windschutz	Fassade nötig	sehr gut
Niederschlag	kritisch, Vereisungsgefahr	unkritisch
Beleuchtung	Sonnenlicht nutzbar	ganztägig Kunstlicht
Gefahr, Kriminalität	sehr übersichtlich	hohes Sicherheitsrisiko

Tabelle 2.1: Sicherheits- und Komfortkriterien bei Über- und Unterführungen

Vorteile	Nachteile
Guter Wetterschutz	Durchgängig Beleuchtung und Belüftung
Unterläuft Stadtverkehr	Keine Außenwirkung / Eigenwerbung
Einfache vertikale Wege	Hohe Baukosten
	Filter gegen Bremsstaub
	Sicherheitsrisiko abends
	Komplizierter Brandschutz

Tabelle 2.2: Vor- und Nachteile unterirdischer Stationen

verschiedene Ebenen in Bahnhöfen zu gelangen. Das Ziel ist, möglichst viele Reisende schnell reibungslos auf ein anderes Höhenniveau zu befördern, dabei Menschen mit viel Gepäck und Rollstuhlfahrer zu berücksichtigen und den Aufwand für Energie und Instandhaltung zu minimieren. Die Förderanlagen haben dabei die in Tabelle 2.3 dargestellte Bilanz.

Anlage	Personenfluß	Energie	Wartung ⁵	Gepäck	Barrierefreiheit
Aufzug	gering	Bedarf	hoch	ideal	ideal
Fahrtreppe	gut	Bedarf	vorhanden	ideal	schwierig
Rampe	sehr weite Wege	kein Bedarf	ideal	ideal	ideal
Treppe allein	gut	kein Bedarf	ideal	schwierig	unmöglich
mit Gepäckförderband	schwierig	Bedarf	sehr hoch	möglich	unmöglich

Tabelle 2.3: Parameter verschiedener Förderanlagen

2.1.3 Detailbetrachtung der räumlichen Struktur

Ein Bahnhof ist demnach kein Gebäude mit einer eindeutigen Grenze zwischen innen und außen. Auf der anderen Seite ist ein Bahnhof auch kein städtebauliches Gebilde, bestehend aus einer Ansammlung autarker Gebäude. Vielmehr ist ein Bahnhof ein System aus verschiedenen Zonen mit unterschiedlichen Anforderungen an Komfort und Funktionalität. Da sich die Zonen auch hinsichtlich ihrer energetischen Potentiale unterscheiden, bestehen energetische Gefälle innerhalb eines Bahnhofes und nach außen. Wie in den Abschnitten 3.1.4 und 3.4 beschrieben, folgt gerade aus dem Bestreben energetischer Gefälle, sich auf ein gemeinsames Niveau auszugleichen, die

⁵Anfällig für Vandalismus

Umwandlung von Exergie in Anergie und die damit verbundene Produktion von Entropie. Um die energetischen Gefälle aufrecht zu erhalten, muß also von außen neue Exergie hinzugeführt werden. Dies wird allgemein als „Energieverbrauch“ bezeichnet. Dieser Nachschub an Exergie kann minimiert werden, wenn

1. Zonen mit geringem energetischen Gefälle aneinander grenzen und
2. die Grenzen zwischen Zonen mit energetischen Gefällen möglichst undurchlässig sind und den Energieausgleich unterbinden

Durch die geschickte Anordnung von Zonen und die Wahl ihrer Begrenzungen kann also der Ausgleichprozeß energetischer Gefälle in einem Bahnhof minimiert und unter Erfüllung der funktionellen Anforderungen und Komfortbedürfnisse somit seine Energieeffizienz optimiert werden.

Für das Empfangsgebäude gibt es zwei grundsätzliche klimatisch und energetisch relevante Strukturvarianten. Die beiden Varianten unterscheiden sich dadurch, ob es entweder viele schwache energetische Gefälle im Empfangsgebäude gibt, oder wenige starke an der Gebäudegrenze nach außen und zu den Bahnsteigen. In der ersten Variante ist die Empfangshalle ein passiver Puffer zwischen den angrenzenden Informations- und Geschäftsbereichen. Diese Bereiche funktionieren wie energetisch und klimatisch autarke Gebäude und haben eine Komfortgrenze zur Empfangshalle. Die Grenze zwischen Halle und Außenbereich besitzt in diesem Fall ein relativ geringes energetisches Gefälle. In der zweiten Variante ist das Empfangsgebäude ein klimatisch geschlossenes Gebäude mit nur sehr geringem internem energetischen Gefälle. Abbildung 2.9 veranschaulicht diese beiden Varianten anhand Prinzipskizzen.

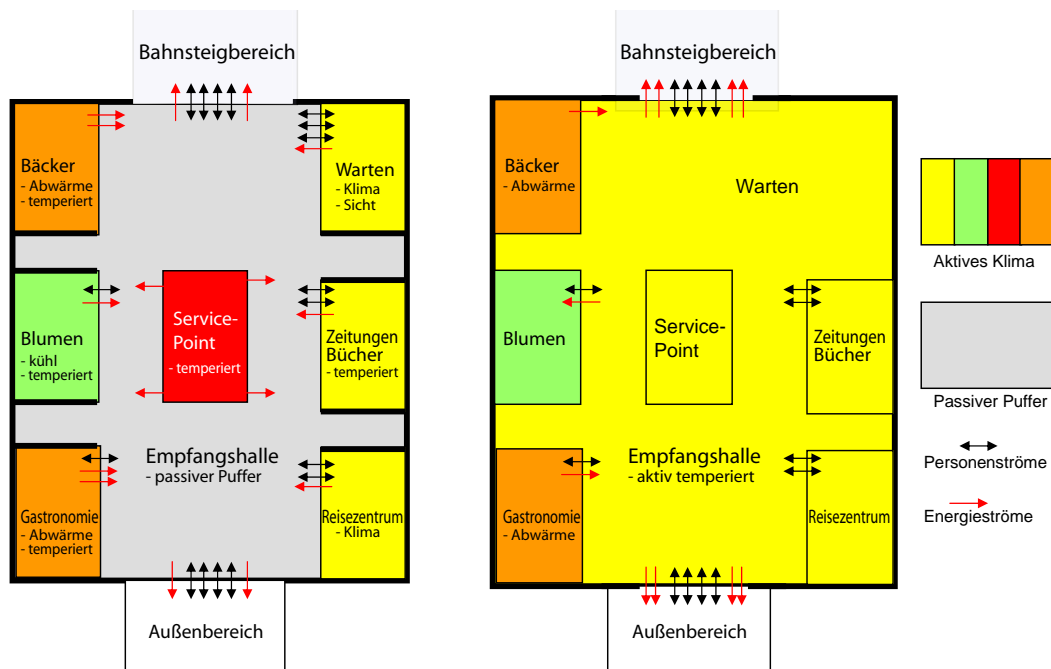


Abbildung 2.9: Zwei Varianten bezüglich der energetischen und klimatischen Zonierung

Gebäudezonen

Abbildung 2.10 verschafft einen Überblick über Zonen mit unterschiedlichen Anforderungen an Komfort und Funktion. Auffällig ist, daß in manchen Zonen verschiedene Nutzergruppen unterschiedliche Anforderungen an Funktionalität oder Komfort haben. Teilweise sind die Ansprüche innerhalb einer Nutzergruppe zusätzlich von der Verweildauer abhängig.

Raumzone	Funktion	Nutzer	Dauer	Raumklima	Sicht	Zugang	Legende / Symbolik
Vorplatz	Zugang						Nutzer / Rollen Reisende Konsumenten Abholer Betriebspersonal Information Einzelhandel
Empfangshalle	Durchgang						
	Treffpunkt						
	Arbeitsplatz			Gemäß Tätigkeitsprofil			Aufenthaltsdauer Wenige Augenblicke bis eine Minute Wenige Minuten bis eine Stunde Mehrere Stunden
Verkehrswege	Durchgang						
Bahnsteig	Übergang Zug						
Wartebereich	Warten auf Zug						Raumklima Wie Außenraum Übergangsklima, gemäßigt, trocken Übergang in klimatisierte Zugabteile Arbeitsplatz, wie Innenraum
	Zugverspätung						
	auf Ankommende						
ServicePoint	Information						Sichtbeziehungen Orientierung Information Ankunft Züge Privatsphäre Reisende, Kunden Beratung, Verkauf
Reisenzentrum	Beratung						
	Fahrscheinkauf						
	Anstehen						
Geschäfte	Verkauf						Zugang Hohe Fluktuation Durchschnittlich Geschlossen / intim
	Stöbern, Kauf						
Gastronomie	Bewirtung						
	Essen, Trinken						
Verwaltung	Bahnhofsbetrieb						
WC-Anlage	Hygiene						

Abbildung 2.10: Raumzonen und ihre Anforderungen durch verschiedene Nutzer

In der ersten Spalte von links sind die wichtigsten Raumzonen aufgeführt, von denen einige monofunktional sind, andere mehrere in der zweiten Spalte aufgeführte Funktionen erfüllen. Diese wiederum dienen verschiedenen Nutzergruppen in Spalte 3, welche sich in Kunden und Beschäftigte aufteilen lassen. Unterschiedliche Nutzer verbringen unterschiedlich viel Zeit im Bahnhof und beeinflussen dadurch das bedarfsgerechte Raumklima, Spalte 5. Die Sichtbeziehung zu bestimmten Informationsquellen, zweite Spalte von rechts, sowie die Stärke der Personenfluktuation, ganz rechts, bestimmen die Art der Raumbegrenzung.

Trennung der Zonen

Neben der Anordnung der Zonen spielt deren Trennung eine wichtige Rolle bei der Minimierung des energetischen Potentialausgleichs in Bahnhöfen. Wie bei Filtern sind bestimmte Zonenbegrenzungen nur für bestimmte Faktoren durchlässig, für andere nicht. Abbildung 2.11 zeigt gängige *horizontale* Begrenzungstypen in Bahnhöfen.

Begrenzung Typ	Durchlässigkeit						Energieeinsatz	
	Visuell	Akustisch	Wärme	Luft	Personen	Züge	Betrieb	Reinigung Wartung
Wand / Mauer	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⬆	⬆
Glas	➡	⊘	⬆	⊘	⊘	⊘	⬆	⬆
Öffnung ohne Luftschleieranlage	➡	⬆	➡	➡	➡	➡	⬆	⬆
mit Luftschleieranlage	➡	⬆	➡	➡	➡	➡	⬆	⬆
Flügeltür manuell	⬆	⬆	➡	⬆	⬆	⊘	⬆	⬆
automatisch	⬆	⬆	➡	⬆	➡	⊘	⬆	⬆
Drehtür manuell	⬆	⬆	➡	⬆	⬆	⊘	⬆	⬆
automatisch	⬆	⬆	➡	⬆	➡	⊘	⬆	⬆
Schiebetür manuell	➡	⬆	➡	⬆	⬆	⊘	⬆	⬆
automatisch	➡	⬆	➡	⬆	➡	⊘	⬆	⬆
Türschleuse manuell	⊘	⬆	⬆	⊘	⬆	⊘	⬆	⬆
automatisch	⊘	⬆	⬆	⊘	⬆	⊘	⬆	⬆

⊘ Keine Durchlässigkeit	⬆ Starke Trennung, geringe Durchlässigkeit	⊘ Akustische Trennung	⬆ Kein Energieeinsatz nötig
➡ Zeitlich wechselnde Trennung / Durchlässigkeit	➡ Gehemmte Durchlässigkeit	⬆ Guter Schallschutz	⬆ Geringer Energieeinsatz
➡ Keine Trennung, hohe Durchlässigkeit	⬆ Schallübertragung	⬆ Hoher Energieeinsatz	

Abbildung 2.11: Varianten der horizontalen Trennung von Gebäudezonen

Zusätzlich sind noch weiche Trennvarianten wie Vorhänge vorstellbar, die aber hygienische Probleme aufwerfen dürften.

Folgende *vertikale* und *horizontale* Raumtrennungen sind in Bahnhöfen vorzufinden:

Trennung vertikal	Horizontal	Besonderheit
Boden, Decke	Wand	-
Treppe	Öffnung	Thermischer Auftrieb
Fahrtreppe		Energiebedarf für Betrieb und Wartung
Rampe		Sehr flach
Galerie	Offenes Fenster	Keine Niveauwechsel für Personen
Fahrstuhl	Türschleuse	Energiebedarf für Betrieb und Wartung

Abbildung 3.21 auf Seite 86 zeigt eine Auswahl der wichtigsten technischen Anlagen, die für Energieverbrauch in Bahnhöfen verantwortlich sind. Durch intelligente räumlich strukturelle Lösungen kann eine Vielzahl dieser Anlagen kompensiert werden. Eine Gegenüberstellung der Funktionalitäten und entsprechenden architektonischen Variablen zeigt Abbildung 2.12.

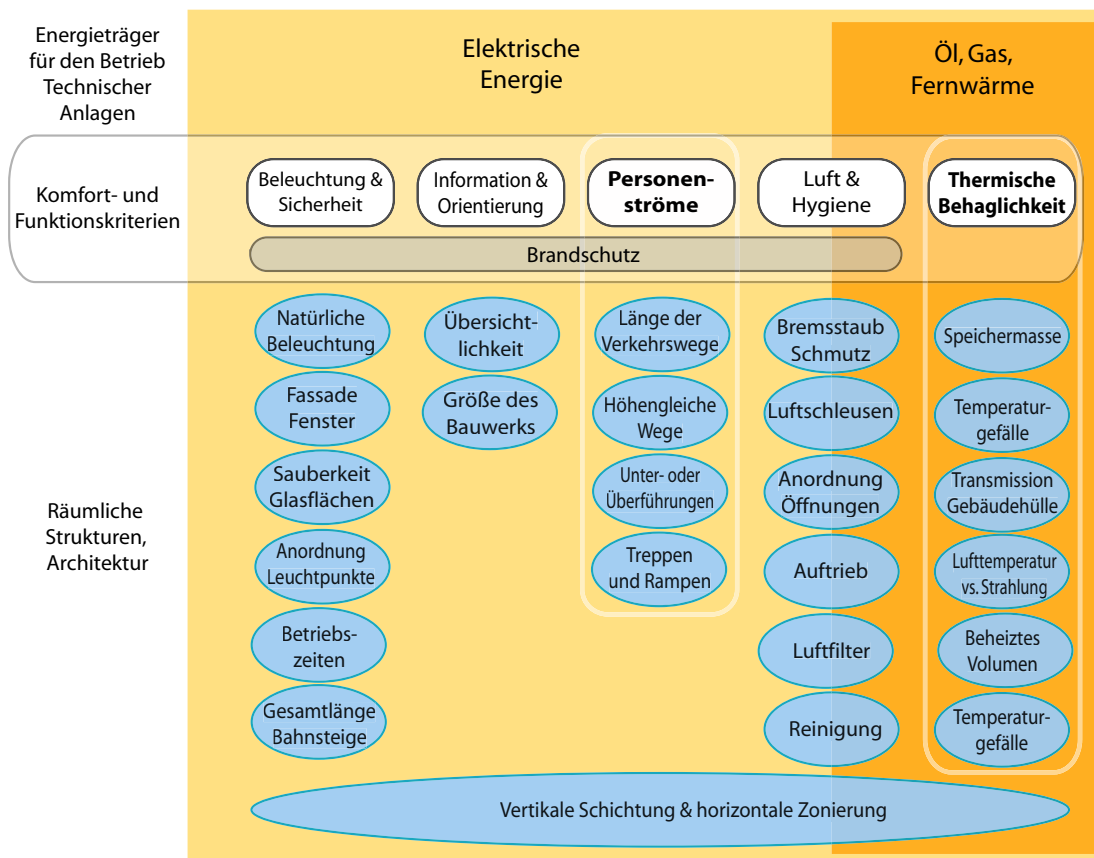


Abbildung 2.12: Kompensation der Funktion technischer Anlagen durch bauliche Lösungen

Die Bewertung der Varianten von Raumbegrenzungen und Zonenübergängen und auch der Kompensationen von technischen Anlagen durch architektonische Lösungen sind in dieser Darstellung recht pauschal und qualitativ. Quantitative Untersuchungen baulicher Varianten, Personenbewegungen und Eindrücke thermischen Komforts erfolgen in den Kapiteln 6 und 7.

Neben der Betrachtung der verschiedenen Gebäudezonen mit ihren funktionellen und klimatischen Anforderungen und den dazwischenliegenden Raumbegrenzungen bleibt noch die Frage danach, auf welche Art und Weise Energieniveaus in den Zonen erzeugt werden. Dabei gibt es zwei grundsätzliche Strategien: Erzeugung eines

- gleichmäßigen energetischen Niveaus durch den zentralen Einsatz leistungsstarker Anlagen
- lokal differenzierten energetischen Niveaus durch den dezentralen Einsatz kleiner Anlagen

In Bezug auf den thermischen Komfort geht die Variabilität der Maßnahmen noch weiter, da innerhalb der Grenzen eines Mindeststandards (siehe Abschnitt 3.3.1 auf Seite 59) Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftbewegung und Dämmwirkung der Kleidung gegenseitige kompensatorische Wirkungen haben. Eine weitere, eher von Marketingaspekten motivierte Methode, den körpereigenen Wärmehaushalt und damit den thermischen Komfort von Reisenden zu unter-

stützen, ist das Angebot von kühlen oder heißen Getränken in der 1. Klasse Lounge. Da diese Methode zwar die Wärmeenergie des Gesamtkörpers beeinflusst, aber weniger das Wärmeempfinden der Haut, ist sie nur als Ergänzung zu anderen Maßnahmen oder für einen stark begrenzten Zeitraum wirkungsvoll. Abbildung 2.13 zeigt Vor- und Nachteile der verschiedenen Varianten auf.

Methode	Vorteile	Nachteile
Luftheizung Konvektion	Gleichmäßige Temperaturverteilung	Gefälleausgleich über Luftaustausch mit anderen Zonen Im Außenbereich daher wirkungslos Große Heizleistung bei hohen Räumen / Hallen Auftrieb, vertikale Schichtung, Wärme über Kopfhöhe Strahlungsasymmetrien
Wärmestrahlung	Lokal differenziertes Erwärmen	Wärmeschatten durch Personen und mobile Geräte Verbrennungsgefahr in der Nähe der Strahler
Kleidung anpassen	Kein Einsatz elektrischer Energie	Raum für Garderobe Aufsichtspersonal, sonst Diebstahlgefahr Nur für mittlere Aufenthaltszeiten geeignet Ohne gleichzeitige körperliche Aktivität keine Wärme
Luftgeschwindigkeit	Kompensation von Wärmeenergie Nutzung natürlicher Thermik möglich	Reduktion der Luftströme hemmt Personenströme Erhöhung der Luftgeschwindigkeit führt zu Zugluft Einsatz von Ventilatoren (+) oder Luftschleieranlagen (-)

Abbildung 2.13: Erzeugung spezieller Wärmeniveaus in Raumzonen in Bahnhöfen

2.2 Bestandserfassung und Kategorisierung

Nach dieser qualitativen Betrachtung soll nun ein quantitatives Bild des Bestandes an Personenbahnhöfen in der Bundesrepublik Deutschland gezeichnet werden. Ziel ist es, ein Gefühl dafür zu bekommen, wie viele Bahnhöfe von welcher Größe welche strukturellen Merkmale nach Abschnitt 2.1.1 besitzen, welche Konsequenzen das für die Optimierung der Energieeffizienz aller Bahnhöfe nach sich zieht und welche Art von Bahnhöfen eine derart große Bedeutung hat, um als repräsentatives Untersuchungsobjekt für diese Arbeit in Frage zu kommen.

Die Quellen der in diesem Abschnitt verwendeten Basisdaten sind die Bahnhofsdatenbanken der DB Station&Service AG. Die speziellen Daten über die verschiedenen architektonischen Strukturmerkmale stammen aus einer gesonderten Erhebung, bei der die Technischen Gebäudemanager aus den verschiedenen Bahnhofsmanagements Formblätter auf Excel-Basis ausgefüllt haben.

2.2.1 Überblick über Quantität und Größe der Bahnhöfe in Deutschland

In diesem ersten Schritt geht es um die Quantifizierung der Bahnhöfe. Stichprobenraum sind *alle* Bahnhöfe in Deutschland. Als Merkmal für die Gruppierung der Bahnhöfe nach Größe und verkehrstechnischer Bedeutung dient die Einteilung „Kategorie Verkehrsstation“ durch die DB Station&Service AG. Danach werden die Bahnhöfe in fünf Gruppen eingeteilt, wonach Kategorie 1 die größten und verkehrsreichsten, Kategorie 5 die kleinsten und verkehrstechnisch unbedeutendsten. In einigen Datenbanken werden die S-Bahnhöfe in den städtischen Ballungsgebieten als zusätzlich sechste Kategorie erfasst, worauf in dieser Darstellung verzichtet wird. Neben dieser Kategorisierung gibt es noch eine weitere, die „Kategorie Vermarktung“. Kriterium dieser Einteilung von A bis F sind Menge und Umsatz der Geschäftslokale in den entsprechenden Bahnhöfen.

Menge aller Bahnhöfe

Abbildung 2.14 zeigt eine Übersicht über die Menge aller Bahnhöfe, gruppiert nach den oben erwähnten Kategorien und der Anzahl an Bahnsteigen. In der Grafik links ist zu sehen, daß mehr als die Hälfte aller Bahnhöfe der Kategorie 5 zugeordnet werden. Die meisten Bahnhöfe haben ein oder zwei Bahnsteige und sind vermarktungstechnisch irrelevant⁶.

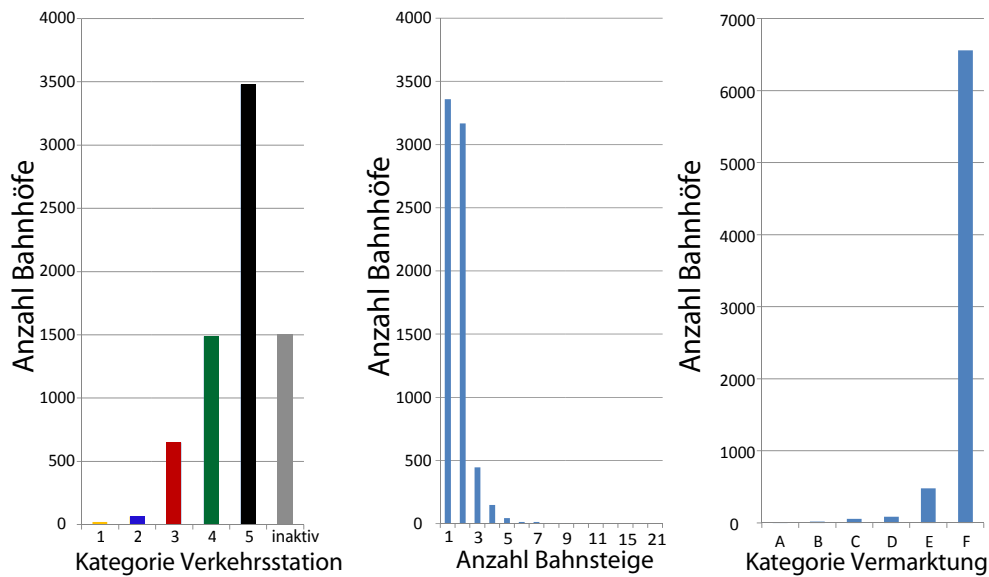


Abbildung 2.14: Anzahl der Bahnhöfe unter verkehrs- und vermarktungsrelevanten Aspekten

Anzahl Bahnsteige pro Bahnhof

Abbildung 2.15 fokussiert den Aspekt der Bahnsteige in *aktiven*⁷ Bahnhöfen. Die relative Verteilung auf die Kategorien zeigt, daß die häufig vorkommenden Anzahlen 1 bis 3 Bahnsteige pro Bahnhof auch mit den häufigsten Bahnhofskategorien 3 bis 5 korrespondieren. Bahnhöfe mit mehr als 7 Bahnsteigen sind selten und werden ausschließlich der Kategorie 1 zugeordnet.

Anzahl Reisende pro Bahnhof

Ein zunächst ähnlich erscheinendes Bild zeichnet das Diagramm links oben in Abbildung 2.16. Hier wird dargestellt, auf welche Bahnhofskategorien „Verkehrsstation“ sich die Reisenden verteilen, wenn sie von Bahnhöfen mit n Bahnsteigen abfahren oder ankommen. Während sich für die Kategorien 1 und 2 und damit Bahnhöfe mit mehr als 4 Bahnsteigen nicht viel ändert bezogen

⁶Die Parameter der Kategorisierung „Vermarktung“ umfassen sowohl Kundenzahlen als auch gewerblich genutzte Flächen in Bahnhöfen, die wiederum vermietet werden oder veräußert worden sind.

⁷Inaktive Bahnhöfe sind stillgelegt. Für die Entbindung von der Verkehrssicherungspflicht und damit den Verkauf und Entnahme aus den Datenbanken ist jedoch noch eine „Entwidmung“ durch das Eisenbahnbundesamt nötig

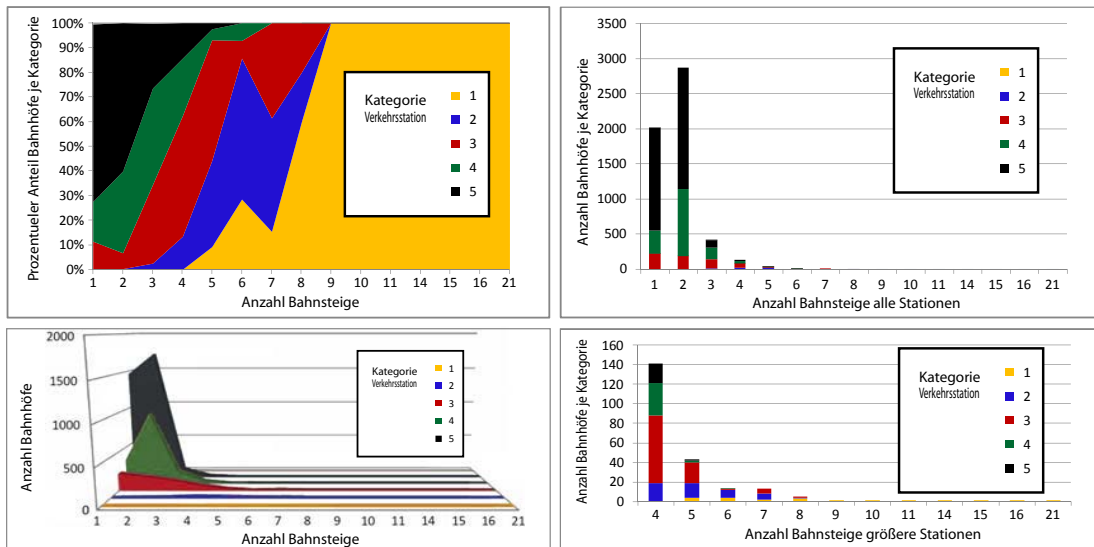


Abbildung 2.15: Relative und absolute Verteilung der Größe „Anzahl Bahnsteige pro Bahnhof“

auf die ungewichtete Betrachtung in Abbildung 2.15, fällt auf, daß unter den Bahnhöfen mit nur 1 bis 3 Bahnsteigen der Verkehrsanteil der Kategorie 3 dominant ist.

Abbildung 2.17 gruppiert die Reisenden sowohl nach verkehrs- als auch vermarktungstechnischen Gesichtspunkten. Das Ergebnis, in der dreidimensionalen Darstellung rechts sichtbar, ist, daß es zwei Modi, also zwei lokale Hochpunkte gibt, die sich diagonal gegenüberliegen. Eine große Gruppe Reisender nutzt Bahnhöfe der Kategorien 1 und 2 mit entsprechend hohem Ausstattungsgrad an Geschäften und Gastronomie. Die weitaus größte Gruppe jedoch nutzt Bahnhöfe der mittleren Verkehrskategorie 3, mit allerdings nur sehr geringem bis nicht vorhandenem Ausstattungsgrad an Geschäften. Die Kategorie 5, zu der mehr als die Hälfte aller Bahnhöfe gehören, spielt dagegen kaum eine Rolle.

Eine vergleichende Darstellung der beiden Größen „Anzahl Bahnsteige“ und „Anzahl Reisende pro Tag“ zeigt Abbildung 2.18. Hier zeigt sich, daß Bahnhöfe mit mehr als 50.000 Reisenden pro Tag deutlich mehr Bahnsteige haben als weniger frequentierte Stationen. Allerdings nimmt die Anzahl der Bahnsteige pro Station auf der rechten Seite der Grafik nicht so stark ab wie die Anzahl der Reisenden. Das bedeutet, daß die Bahnsteige in größeren Stationen effizienter, also von mehr Reisenden genutzt werden.

Fläche pro Bahnhof

Das dritte Kriterium zur Messung der Größe eines Bahnhofs ist die summierte Grundfläche aller Raumzonen. Abbildung 2.19 zeigt die durchschnittliche Fläche pro Bahnhof einer bestimmten Kategorie und Raumzone. Die Bahnsteigfläche korreliert mit der oben untersuchten Größe Anzahl Bahnsteige. Auch die anderen Flächen verteilen sich je nach Kategorie ähnlich. Bemerkenswert sind aber folgende beiden Aspekte:

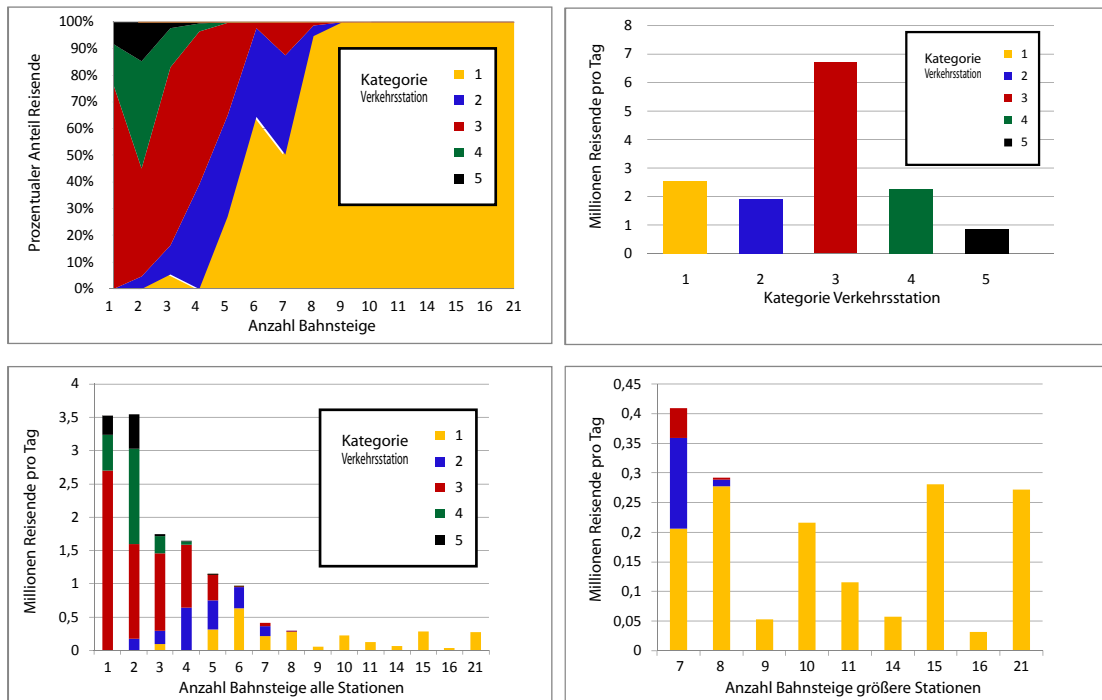


Abbildung 2.16: Relative und absolute Verteilung der Größe „Anzahl Reisende pro Bahnhof“

- Bahnhöfe der Kategorie 3 besitzen kaum Wartezonen, obwohl sie von der größten Anzahl Reisender genutzt werden
- Bahnhöfe der Kategorie 2 besitzen überaus große Parkflächen. Hier könnte die Funktion Park'n'Ride eine Rolle spielen

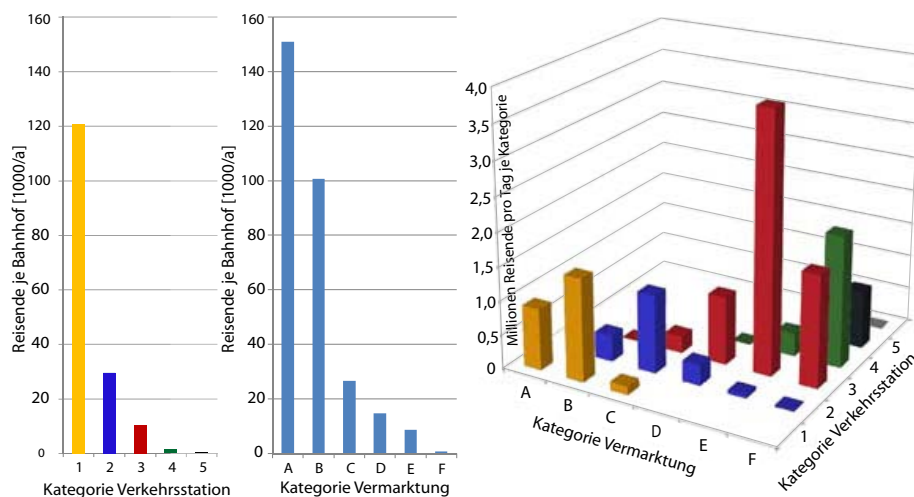


Abbildung 2.17: Anzahl Reisende nach Kategorien Verkehrsstation und Vermarktung

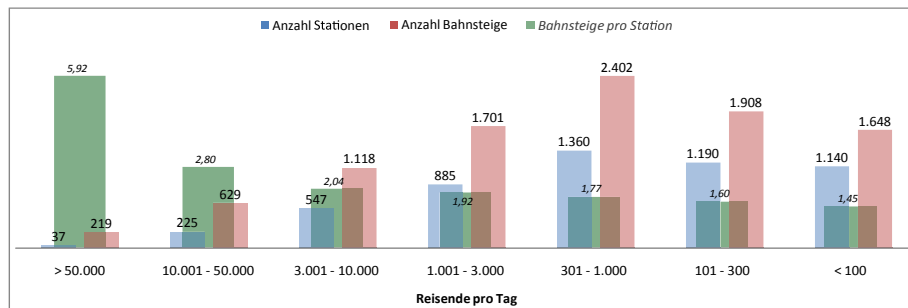


Abbildung 2.18: Vergleich Reisendenzahlen und Bahnsteige pro Station

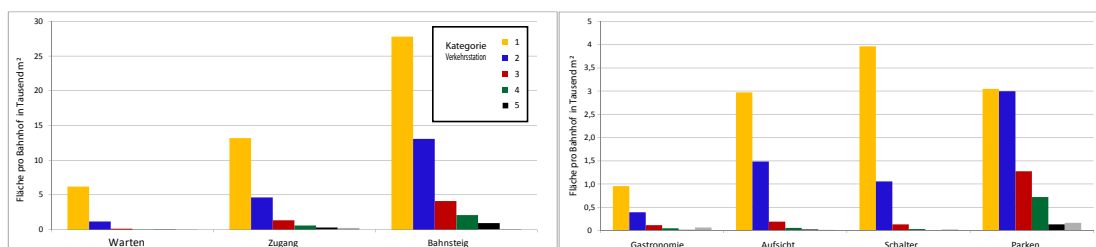


Abbildung 2.19: Durchschnittliche Größe der Raumzonen nach Kategorie Verkehrstation

Zughalte

Ein viertes Kriterium ist die Anzahl der täglichen Zughalte getrennt nach Fern-, Nah- und Stadtverkehr. Abbildung 2.20 verdeutlicht die große Bedeutung des Nahverkehrs und Bahnhöfe mittlerer Größe. Die große Anzahl Zughalte in der Kategorie 5 werden nach Abbildung 2.17 jedoch nicht durch entsprechende Reisendenzahlen untermauert.

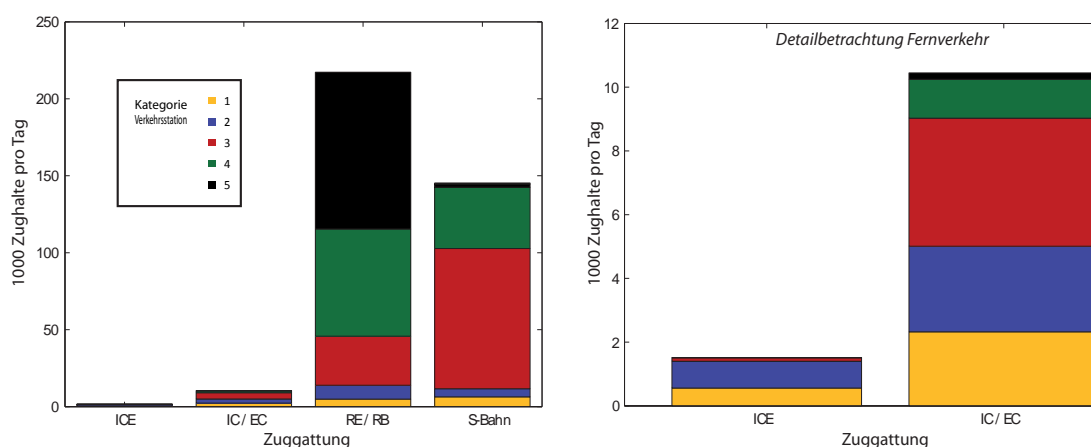


Abbildung 2.20: Anzahl Zughalte nach Zugkategorie und Bahnhofskategorie

Nicht zuletzt ist auch die Existenz eines Empfangsgebäudes ein wichtiges Merkmal für die Größe eines Bahnhofs, siehe Abbildung 2.21.

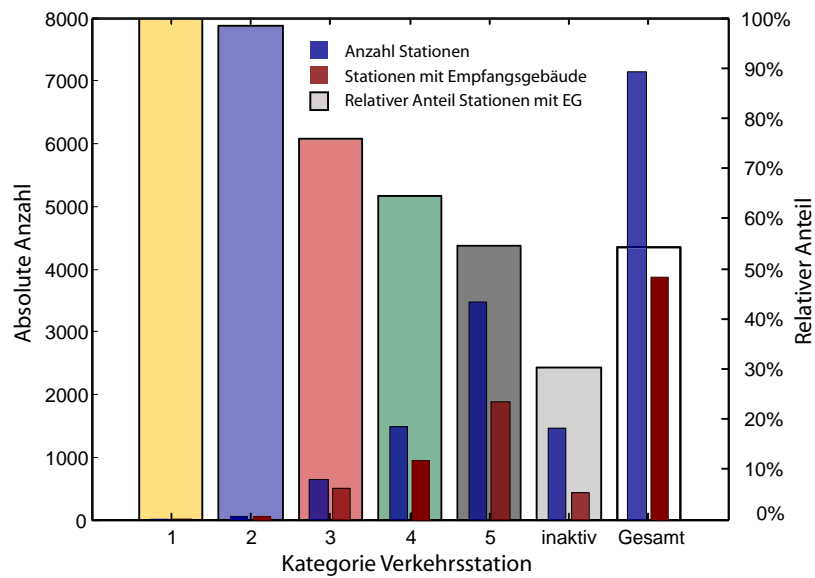


Abbildung 2.21: Anzahl und relativer Anteil der Bahnhöfe *mit* und *ohne* Empfangsgebäude

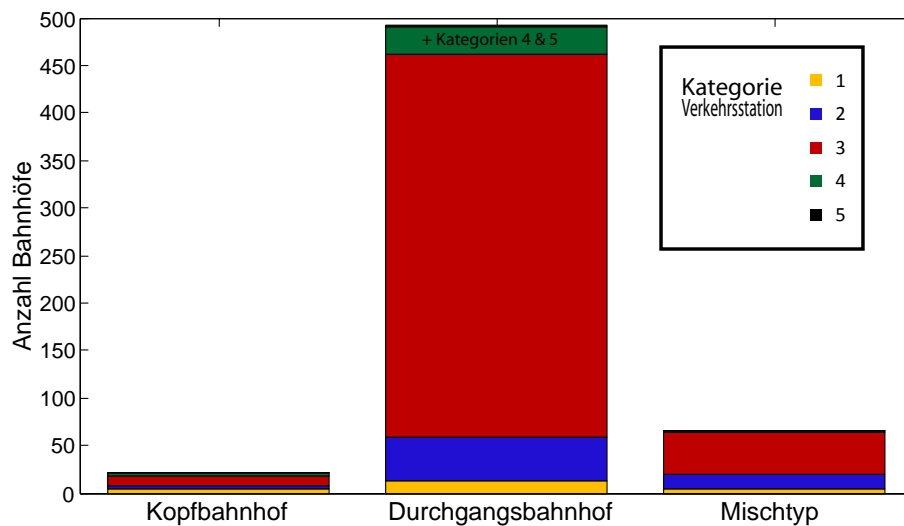


Abbildung 2.22: Verteilung der Varianten Zugbetrieb der Bahnhöfe Kategorie 1-3

2.2.2 Statistik der baustrukturellen Eigenschaften

Im folgenden Abschnitt wird die quantitative Verteilung bestimmter baulicher Strukturen betrachtet. Stichprobenraum ist hier nicht die Gesamtheit aller Bahnhöfe, da die große Menge an Bahnhöfen der Kategorie 5 ohne nennenswerte Hochbauten das Bild verzerren würde. Grundlage sind sämtliche Bahnhöfe der Kategorien 1 bis 3, sowie einige wenige Stationen der Kategorien 4 und 5. Die Erhebung mit einem Umfang von 557 Bahnhöfen wurde im Jahr 2004 mit Hilfe der Technischen Gebäudemanager der DB Station&Service AG durchgeführt.⁸

Geometrische Konstellation

Im ersten Schritt wird die Lage des Empfangsgebäudes, sofern vorhanden, in Relation zu den Bahnsteigen und Gleisen gesetzt. Abbildung 2.22 zeigt, daß der Typ „Durchgangsbahnhof“ eine dominierende Rolle spielt. Die nicht aufgeführten kleinen Stationen der Kategorien 4 und 5 gehören ebenfalls zum allergrößten Teil dieser Gruppe an.

Auch bei der horizontalen Anordnung der Empfangsgebäude und Bahnsteige gibt es eine dominante Gruppe, und zwar die Bahnhöfe, bei denen die Empfangsgebäude *neben* den Gleisen angeordnet sind. Empfangsgebäude und Verkehrsstationen bilden in diesem Fall keine echte bauliche Einheit. Empfangsgebäude zwischen Gleisen sind sehr schlecht vom Stadtverkehr aus zu erreichen und daher auch selten. Empfangsgebäude, die in der Flucht der Gleisachse liegen, sind entweder Kopf-, unterirdische oder aufgeständerte Bahnhöfe. Sie bilden eine wesentlich stärkere architektonische Einheit als nebeneinanderliegende Ensembles, und sind vor allem großen Bahnhöfen vorbehalten.

Abbildung 2.24 zeigt die unterschiedlichen vertikalen Strukturen. Hier gibt es mehr Gruppen, da Empfangsgebäude und Bahnsteige / Gleise unabhängig voneinander einen räumlichen Bezug zur Geländeoberkante haben können. Am häufigsten ist der Typ *oberirdischer Bahnhof*, bei dem sowohl Empfangsgebäude als auch die Verkehrsstation auf der Geländeoberkante liegen. Die zweit- und drittstärkste Gruppe sind Bahnhöfe mit unterirdischen Verkehrsstationen, bei denen sich das Empfangsgebäude entweder oberhalb der Geländekante oder ebenfalls unterirdisch befindet. Am kleinsten ist die Gruppe der aufgeständerten oder erhöhten Bahnhöfe, die vor allem Berliner S-Bahnhöfe umfaßt. Die ganz rechts dargestellte Gruppe besitzt Gleisanlagen auf verschiedenen Ebenen. Auch hier gehören vor allem Bahnhöfe mit unterirdischen S-Bahnsteigen dazu.

Material und Transparenz der Hülle

Die Abbildung 2.25 zeigt die Transparenzeigenschaften der Bahnsteig- und Empfangshallen, sofern vorhanden. Die Transparenz hat Einfluß auf den Bedarf an Kunstlicht, aber auch auf den regelmäßigen Reinigungsaufwand. Die Große Mehrheit der Empfangsgebäude ist massiv, während Bahnsteige entweder völlig offen oder teiltransparent bebaut sind.

⁸Der Bahnhof „Berlin Hauptbahnhof Lehrter Bahnhof“ war zu diesem Zeitpunkt noch ein reiner S-Bahn-Haltepunkt. Seine Parameter habe ich nach Fertigstellung in die Erhebung eingearbeitet

Wetter- und thermischer Schutz

Als nächstes werden die Wetter- und thermischen Schutzeigenschaften der Hülle betrachtet. Die Empfangsgebäude bieten zwar weitgehenden Wetterschutz, sind in der Regel nicht klimatisiert und bieten auch keinen technischen Schutz gegen Luftzug. Der Bahnsteigbereich bietet folgende Szenarien: Der überwiegende Teil der Bahnhöfe der Kategorien 1 bis 3 besitzt Bahnsteigdächer, die gegen Niederschlag, aber in keiner Weise gegen Wind und extreme Außentemperaturen schützen. In diesen Fällen sind die Bahnsteige eindeutig dem Außenraum zuzuordnen. Würde man die Gesamtheit aller Bahnhöfe, also insbesondere auch die Kategorien 4 und 5 vollständig betrachten, so hätte die größte Gruppe offene Bahnsteige ohne Wetterschutz. Große Bahnhöfe der Kategorie 1 haben in der Regel Bahnsteighallen, die nicht nur gegen Niederschlag, sondern auch Wind und Wärmeverlust durch Strahlung schützen.

Wegeführung zwischen den Raumzonen

Unterschiedliche Arten der Wegeführung üben Einfluß auf den Energieverbrauch aus, da bei vertikalen Wegen Fördertechnik nötig ist, und thermischer Auftrieb zwischen den Zonen entsteht.

Abbildung 2.27 zeigt verschiedene Varianten der Wegeführung zwischen Empfangsgebäuden und Bahnsteigen. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten werden in Abschnitt 2.1.1 diskutiert. Der häufigste Typ ist die Verbindung der nebeneinanderliegenden Einheiten Empfangsgebäude und Verkehrsstation durch eine Unterführung. Ein Niveauwechsel ist nur notwendig bei unterirdischen oder aufgeständerten Bahnhöfen. Höhengleiche Wegeführungen sind bei Kopfbahnhöfen oder bei sehr kleinen Bahnhöfen mit einem Bahnübergang für Fußgänger möglich.

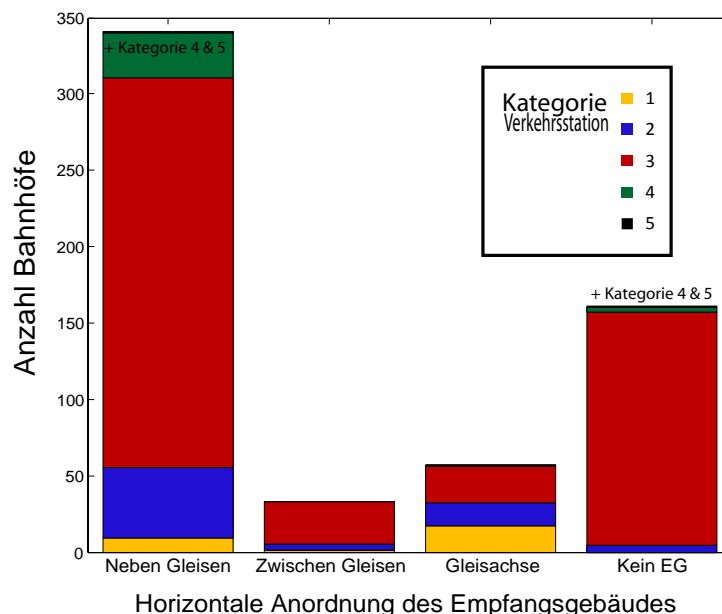


Abbildung 2.23: Verteilung der Varianten Horizontale Struktur der Bahnhöfe Kategorie 1-3

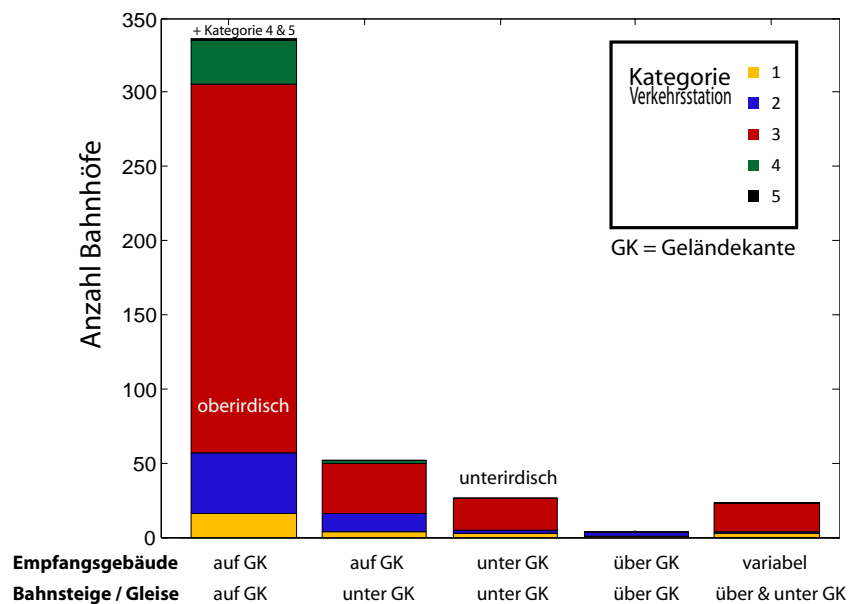


Abbildung 2.24: Position der Gleise und des Empfangsgebäudes bezogen auf die Geländekante

Ist zur Nutzung eines Bahnhofs mindestens ein Ebenenwechsel nötig, so sind entsprechende technische oder bauliche Anlagen nötig. Abbildung 2.28 zeigt, daß in solchen Fällen am häufigsten Aufzüge eingesetzt werden. Aufzüge verbrauchen wenig Grundfläche, können mit Rollstühlen oder Fahrrädern benutzt werden und frieren bei Kälte nicht so leicht ein. Allerdings befördern sie deutlich weniger Personen pro Zeiteinheit als Fahrtreppen oder Rampen.

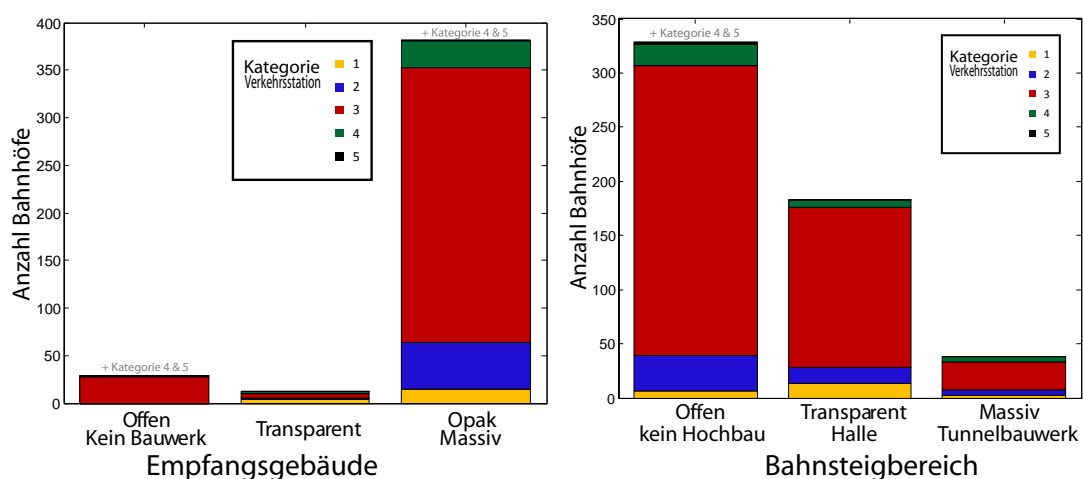


Abbildung 2.25: Transparenz der Hülle der Empfangs- und Bahnsteighalle

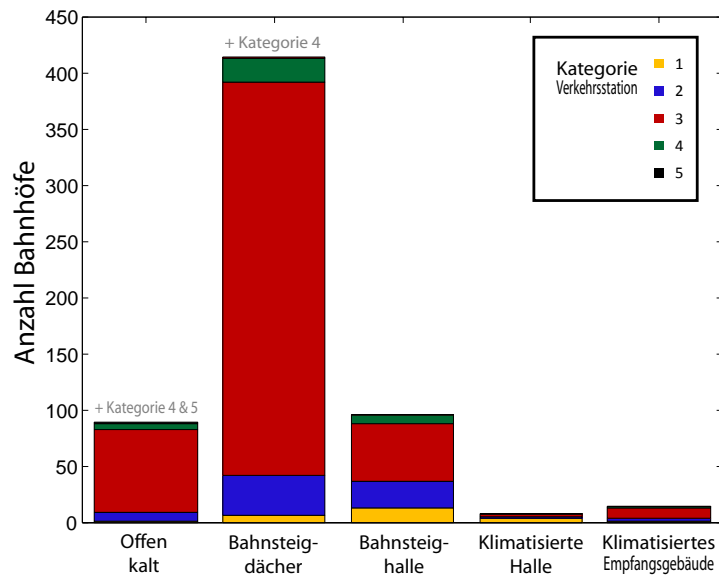


Abbildung 2.26: Wetter- und thermischer Schutz bei Bahnhöfen

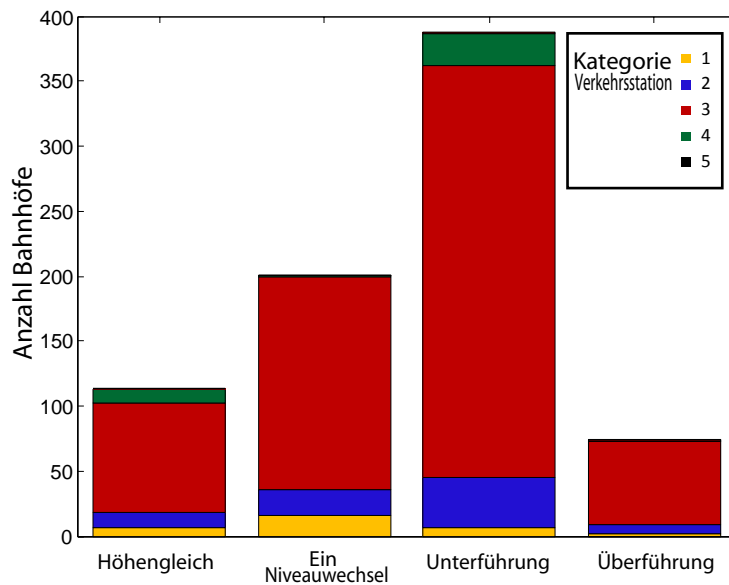


Abbildung 2.27: Wegführung zwischen Empfangsgebäude und Bahnsteigen

2.2.3 Auswertung

Die statistischen Untersuchungen über die vorhandenen Bahnhofstypen und ihre baulichen Strukturen ergeben, daß kleine Haltepunkt mit oder ohne Empfangsgebäude zwar die größte Gruppe an Bahnhöfen darstellen, jedoch unter dem Aspekt *Anzahl Reisende* kaum eine Rolle spielen. Selbst

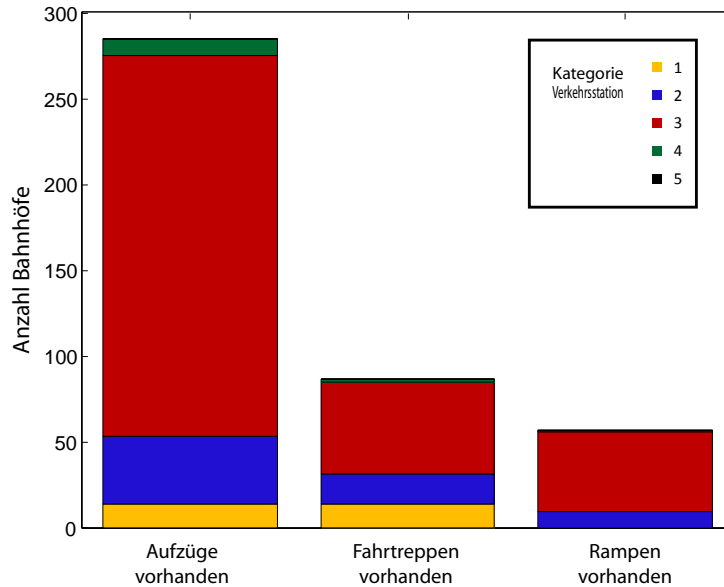


Abbildung 2.28: Technische und bauliche Anlagen zur Überwindung von Höhendifferenzen

in ihrer Gesamtheit bilden sie keine relevante Größe für das System Bahn und seine Wettbewerbsfähigkeit im Verkehrsmarkt. Die großen Stationen der Kategorien 1A und B haben die spezifisch höchsten Reisendenzahlen und spielen eine wichtige Rolle für Umsteiger. Aufgrund ihrer geringen Anzahl sind sie ebenfalls nicht die bedeutsamste Gruppe Bahnhöfe. Die mittleren und größeren Bahnhöfe der Kategorien 2 und 3 sind insgesamt die Bahnhöfe mit den meisten Reisenden. Ob sie auch die umsatzträchtigsten Stationen sind, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden, denn dazu müßten neben den Reisendenzahlen auch Informationen über die durchschnittlichen Reisedistanzen pro Ankunft- und Abfahrtbahnhof bekannt sein.

Der Fokus dieser Arbeit liegt also auf einer verallgemeinerbaren Optimierungsstrategie für mittlere und größere Bahnhöfe, da hier

- kritische Masse erreicht wird hinsichtlich
 - Anzahl Bahnhöfe
 - Gesamtanzahl Reisende
- die bauliche Homogenität innerhalb der Gruppe ausreichend ist
- die Größe der Bahnhöfe mit dem zur Verfügung stehenden Aufwand handhabbar ist

Damit einher geht die Empfehlung, für die größten Bahnhöfe der Kategorie 1 Einzelfallstudien und -planungen durchzuführen, die auf den Ergebnissen dieser Arbeit basieren. Für die kleinsten Stationen der Kategorie 5 sollten Mindeststandards für den Wetterschutz eingehalten werden. Weitergehende komfortsteigernde Maßnahmen sollten davon abhängen, ob die jeweilige Station noch langfristig in Betrieb sein wird und die Reisendenzahlen steigen. Wenn die Relevanz für den öffentlichen Verkehr ähnlich der einer Bushaltestelle ist, dann wird auch die bauliche Struktur sich eher daran als an großen oder mittelgroßen Bahnhöfen messen.

3 Stand der Forschung

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Forschung zum Thema *Energieeffizienz* als Funktion von *Funktionalität*, *Komfort* und *Energieverbrauch* betrachtet. Zunächst werden die zentralen Begriffe definiert und erläutert. In den darauf folgenden Abschnitten werden Vergleiche zu Bereichen in Wirtschaft und Industrie gezogen, in denen die Themen Energieeffizienz und Komfort bereits sehr intensiv erforscht wurden und weiterhin werden.

Mangels Publikationen zum Thema *Komfort in Bahnhöfen* wird eine vergleichende Analyse zu den Themen *Komfort unterschiedlicher Reiseketten* und *Komfort in Gebäuden* dargestellt.

Die Literaturrecherche über die *Energieeffizienz von Gebäuden* zeigt auf, welche Fortschritte bereits bei Gebäudetypen mit anderen funktionalen Anforderungen erzielt wurden.

Zum Abschluß dieses Kapitels werden Modellieretechniken und numerische Verfahren diskutiert, die als Software auf dem Markt erprobt sind oder in der Literatur beschrieben werden. Aus diesen Modellen leitet sich ein Teil der in den Abschnitten 5.1 und 6.1 dargestellten und für diese Arbeit entwickelten Modelle ab.

3.1 Begriffsdefinitionen

3.1.1 Energieeffizienz

Zunächst soll der Begriff „Effizienz“ geklärt werden. Auf Wikipedia[133] heißt es dazu:

Effizienz (v. lat.: efficere „zustande bringen“) ist das Verhältnis vom Nutzen zu dem Aufwand mit dem der Nutzen erzielt wird. Stellt man Nutzen und Aufwand jeweils als Zahlenwert dar, gilt im Allgemeinen: Effizienz gleich Nutzen geteilt durch Aufwand. Ein effizientes Verhalten führt wie auch ein effektives Verhalten zur Erzielung einer Wirkung, hält aber darüber hinaus den dafür notwendigen Aufwand möglichst gering.

Über die „Energieeffizienz“ steht in derselben Quelle[134]:

Energieeffizienz bedeutet, daß ein „gewünschter Nutzen mit möglichst wenig Energieeinsatz erreicht wird. Gemäß dem ökonomischen Prinzip sind Vorgänge auf Dauer nur dann nachhaltig erfolgreich, wenn jeder unnütze Verbrauch vermieden wird. Das gilt im Besonderen auch für die Energie, die sich mit der Zeitdauer der wirkenden Leistung ergibt. Unter Nutzen wird die Erreichung gewünschter Eigenschaften, Waren, Dienstleistungen oder Energie verstanden.“

Energieeffizienz bedeutet eine Minimierung des Ressourceneinsatzes in physikalischer Hinsicht, wodurch in der Regel auch wirtschaftliche Vorteile erzielt werden. In der Stromwirtschaft gibt es jedoch über die physikalisch-wirtschaftlichen Maßnahmen auch noch eine rein wirtschaftliche Effizienz, die darauf beruht, daß elektrische Energie nicht nur als Menge, sondern auch als zeitabhängige Leistung bereitgestellt werden muß. Strom kann technisch nur sehr aufwendig gespeichert werden, daher müssen die Mengen der Bereitstellung und die des Verbrauchs zu jedem Zeitpunkt möglichst übereinstimmen. Dazu sind möglichst exakte Verbrauchsprognosen nötig, die den Energieversorgern gemeldet werden. Wenn der tatsächliche Energieverbrauch unter dem prognostizierten Energiebedarf liegt, ist zuviel Energie im Netz, die nicht verbraucht wird. Ist der Energieverbrauch jedoch höher als prognostiziert, entsteht eine Versorgungslücke. Dies betrifft vor allem sogenannte *Lastspitzen*. Um diese Lastspitzen mit 100%iger Versorgungssicherheit bedienen zu können, müssen die Energieversorger grundsätzlich Redundanzen in der Bereitstellung vorhalten, die den Energiepreis deutlich beeinflussen. Energieeffizienz bedeutet in diesem Kontext die Vermeidung von Lastspitzen sowie die möglichst genaue Prognose der verbleibenden Höchstlasten. Nach Hanitsch[67] betrifft die Problematik der Lastspitzen die Bereitstellung aller leitungsgebundener Energieformen, also neben Strom auch Gas.

3.1.2 Komfort

Komfort ist keine objektive, physikalische Größe, sondern ein Zustand, der je nach Person, Situation und Erfahrungsbereich unterschiedlich assoziiert sein kann. Um den Begriff Komfort enger und präziser fassen zu können, soll ein Blick in verschiedene wissenschaftliche Publikationen, aber auch Lexika und Wörterbücher mehr Klarheit schaffen. Eine branchenübergreifende Analyse verdeutlicht die Wichtigkeit von Komfort in unterschiedlichen Lebensbereichen. Zum Abschluß des Abschnittes werden verschiedene Bewertungsmethoden für Komfort diskutiert, da Komfort von verschiedenen Menschen unterschiedlich beurteilt wird.

Lexikalische Definition

Meyers Online Lexikon[137] bietet folgende Definition an:

Komfort „(französisch-englisch) der, luxuriöse Ausstattung, behagliche Einrichtung; Annehmlichkeiten; Bequemlichkeit.“

Das Kluge Etymologisches Lexikon[83] schreibt über die Herkunft des Wortes „Komfort“:

Komfort *m.* (<19. Jhdt) Entlehnt aus ne.¹ *comfort* 'Bequemlichkeit, Annehmlichkeit, (auch: Trost, Stärkung)', dieses aus afrz. *confort* 'Trost, Stärkung', einer Ableitung aus afrz. *conforter* 'stärken, trösten', aus l. *confortare* 'kräftig stärken', zu l. *fortis* 'stark, fest' und l. *con-*. Der Bedeutungswandel im Englischen erklärt sich als Übergang von 'Trost, Stärkung' zu 'Zustand des Getröstet- und Gestärktseins, d.h. angenehmer Zustand ohne Schwäche und Leid'.

Auf Wikipedia[135] liest man zum Thema Komfort:

¹ne=Neuenglisch, afrz=Altfranzösisch, l=Lateinisch

Komfort „(englisch: comfort / deutsch: Bequemlichkeit, Behaglichkeit) ist die Bequemlichkeit, die auf der Existenz von bestimmten Geräten, Gegenständen oder Einrichtungen beruht. Eine Einrichtung ist auf Grund ihrer Möglichkeiten und ihrer Ausstattung mit Gegenständen komfortabel, wenn sie dem Menschen Arbeit verringert und ihm Behaglichkeit bietet.

Komfort lässt sich allgemein auch als Abwesenheit von Diskomfort, also als Abwesenheit von auffälligen unangenehmen Empfindungen definieren. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Mensch ständig aktuelle mit bisher erlebten Situationen vergleicht. Solange keine Diskrepanzen zwischen dem Erlebten und den an die Situation gestellten Erwartungen bestehen, wird diese Situation nicht bewusst wahrgenommen. Erst wenn Unterschiede auftreten, werden diese konkret festgestellt. Demnach ist der Komfort abhängig von den Erwartungen des Komfortbeurteilenden. Jeder Mensch entwickelt eine sog. Komfort-Hierarchie. Je mehr Komfortbedürfnisse bereits erfüllt sind, desto höhere Bedürfnisse werden entwickelt. Die bereits erfüllten Bedürfnisse werden als selbstverständlich angesehen und nicht mehr wahrgenommen.

Nach Zhang, Helander und Drury (1996) sind Komfort und Diskomfort nicht auf der Achse eines Kontinuums angeordnet. Nach Ihrer Clusteranalyse von Begrifflichkeiten ist Komfort mit dem Aspekt des Gefallens, Diskomfort mit dem Aspekt des Erleidens verbunden. Es ist somit möglich, Komfort und Diskomfort zur gleichen Zeit zu erfahren. Als Beispiel könnte hier das Fahren eines extremen Sportwagens dienen. Objektiv herrscht im Vergleich zu einer Limousine hoher Diskomfort (Schwingung, Lärm, ...). Subjektiv empfindet der Fahrer meist Gefallen am Fahren des Sportwagens. Somit treten Komfort und Diskomfort zur gleichen Zeit auf[81].“

Kempfert faßt in [21] den Begriffs „Komfort“ folgendermaßen zusammen:

- auf technisch vollkommenen Einrichtungen beruhende Bequemlichkeit
- Behaglichkeit
- luxuriöse Ausstattung

Auch Vink[2] ist in Wörterbüchern auf Beschreibungen des Begriffs „Komfort“ gestoßen:

- Schmerzfreiheit, Wohlbefinden
- bequemer Innenraum, körperliches Wohlbefinden
- sichtbare Dinge wie Kleidung, Schuhe
- Sich keine Sorgen machen müssen („Komfortabler Vorsprung“)
- Komfort ist eine Reaktion auf die Umgebung

Ahmet E. Cakir stößt bei seiner Recherche in antiken Schriften[4] zum ersten Mal bei dem Griechen Protagoras auf den Begriff „Komfort“. Für Protagoras spiegelt sich Komfort vor allem in der Feststellung wider, daß der Mensch das Maß aller Dinge sei. In der jüngeren Geschichte regeln beispielsweise Arbeitsstättenverordnungen die Komfortbedingungen der menschlichen Umgebung. Als erster Komfortparameter wird dort chronologisch gesehen Licht bzw. Sehkomfort genannt. Dieser besteht zum einen aus meßbaren Größen wie Beleuchtungsstärke oder -dichte. Dagegen sind menschliche Begriffe wie Farbe, subjektive Helligkeit und Ermüdung in ihrer Wahrnehmung

nicht quantifizierbar. Komfort wird nach Cakir von vielen Menschen auch als „Behaglichkeit“ oder „Bequemlichkeit“ verstanden, als Luxus und Überflüssigem, nicht als etwas Rationelles, Wirtschaftliches. Eine andere Definition setzt Komfort gleich mit dem Glück, das ein Nutzer während der Interaktion mit einem Objekt erfährt („Use of Joy“). Ein weiterer Ansatz drückt Komfort als die technische Möglichkeit des Menschen aus, seine Wünsche und jeweils gewählten Ziele, seien sie noch so unsinnig, frei von Störungen jeglicher Art und mit Freude anzugehen. Dem gegenüber existiert im angloamerikanischen Sprachraum eine etwas sachlichere Definition, die Komfort als die Erfüllung der Gebrauchstauglichkeit durch Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit bzw. Zufriedenstellung des Nutzers sieht.

Optimierung von Komfort

Nach Vink[2] wird das Komfortempfinden maßgeblich von der persönlichen Erfahrung geprägt, also Erinnerungen, tatsächlicher Vergangenheit, Gewohnheiten und Erwartungshaltungen, als auch nach der persönlichen Verfassung, die auf der Gemütslage und der jeweils aktuellen Situation basiert. Dabei ist Abwesenheit von Diskomfort nicht gleich Komfort. Komfort geht über die Erwartungen der Nutzer hinaus. Des weiteren setzt sich Vink mit dem Streben nach Komfort auseinander. Aufgrund seiner Erfahrung fallen ihm in dem Kontext folgende drei Probleme auf:

1. Die Ursache für Komfort oder Diskomfort ist unbekannt
2. Individuell unterschiedliches Empfinden von Komfort
3. Der Prozess des Komfort Designs ist unbekannt, es gibt keine Modelle.

Abhilfe schaffen statistische Erhebungen unter Menschen, die letztendlich durch den Gebrauch von Produkten persönliche Erfahrungen mit deren Komforteigenschaften sammeln. Durch seine Untersuchungen kommt Vink zu dem Schluß, daß ein Produkt nicht komfortabel sein kann, sondern nur sein Gebrauch. In seinem Kontext bedeutet Komfort eine Bequemlichkeit, die vom Nutzer während oder nach der Anwendung eines Produktes erfahren wird. Die Bewertungskriterien gehören dabei einer der in Tabelle 3.1 genannten Kategorien an.

<i>Kategorie</i>	<i>Quantifizierbarkeit</i>
Deterministisch	zählbar, meßbar
Linguistisch	beschreibbar
Probabilistisch	wahrscheinlich, zufällig

Tabelle 3.1: Bewertungskriterien

Die Tatsache, ob ein technisches System komfortabel ist, hat weitreichende Konsequenzen für seine Überlebensfähigkeit auf dem Markt. Die Frage nach dem Komfort beeinflusst Entscheidungen über

- Entwicklung
- Kauf
- Benutzung
- Umgestaltung und Anpassung[21].

<i>Psychologische Faktoren</i>	<i>Physiologische Faktoren</i>	<i>Situative Faktoren</i>
Einstellung	Alter	Sozioökonomischer Status
Erwartungen	Geschlecht	Vorherige Erfahrungen mit dem untersuchten Gegenstand
Ängste und Gefühle		
Vorstellungen	Gesundheitszustand	Dauer der Interaktion

Tabelle 3.2: Bewertungsfaktoren für Komfort

Nach Renate Krist[10] sind die in Tabelle 3.2 aufgelisteten Faktoren entscheidend für die Bewertung von Komfort.

In seiner Studie „Comfort and Design -Principles and good practise“ [2] betrachtet Peter Vink die Notwendigkeit von Komfort als notwendiges Ziel beim Produktdesign. Für ihn sind Komfort und Diskomfort Indikatoren dafür, wie Menschen mit dem technischen und gesellschaftlichen Wandel mithalten können. Für den Anbieter von Produkten ist Komfort der entscheidende Vorteil im Wettbewerb um Marktanteile, wenn Leistungsfähigkeit und Preis der eigenen und der konkurrierenden Produkte sich immer mehr angleichen. Aber auch für Käufer von Produkten spielen deren Komforteigenschaften eine große Rolle, da durch diese die eigene Produktivität und Effizienz steigen.

Diskomfort

Krist hat im Jahr 1993 eine Diskomfortpyramide in Anlehnung an die Bedürfnispyramide von Maslow (1978, zitiert in [4]) aufgestellt, siehe Abbildung 3.1. Die Pyramide ist so zu interpretieren, daß Störungen, die weiter unten aufgelistet sind, Diskomfort bei Reisenden verursachen, während simultan auftretende Störungen, die auf einem höheren Niveau angesiedelt werden, nicht negativ auffallen. Erst wenn alle weiter unten stehenden Störungen beseitigt sind, werden die weiter oben stehenden Ursachen für Diskomfort deutlich wahrgenommen.



Abbildung 3.1: Diskomfortpyramide nach Krist

Komfortoptimierer sollten die Komfort-Pyramide von unten nach oben durcharbeiten. Die in der Diskomfortpyramide oben angesiedelten Kriterien (Punkte 6. und 7. in Abbildung 3.1) sind jedoch schwierig zu verbessern, da ihre Bewertung subjektiv erfolgt[4].

Krist vergleicht Komfort und Diskomfort in ihrer gegenseitigen Wirkungsweise mit Motivation und Demotivation in der von Herzberg 1958 aufgestellten Motivationstheorie [11]. Nach Herzberg haben Einflußgrößen wie beispielsweise das Gehalt kein positives Motivationspotential. Gehalt kann zwar demotivieren, wenn es nicht den Erwartungen des Arbeitnehmers entspricht. Macht die Arbeit keinen Spaß, kann selbst ein unendlich hohes Gehalt langfristig keine Motivationsquelle darstellen. Langweilige, wiederkehrende Aufgaben besitzen ein hohes Demotivationspotential, ihre Abwesenheit motiviert aber noch nicht. Demgegenüber besitzen Zielorientierung, eine positive Lernkurve, Anerkennung und berufliche Weiterentwicklung ein hohes Motivationspotential.

Ähnlich funktioniert auch die Kano-Methode (zitiert in [109]), die zwischen Qualitätsmerkmalen unterscheidet, die unbewußte Bedürfnisse erfüllen (Dissatisfier) und solchen Merkmalen, die Produkte zum Marktführer in ihrem Bereich machen können, siehe auch Abbildung 3.2.

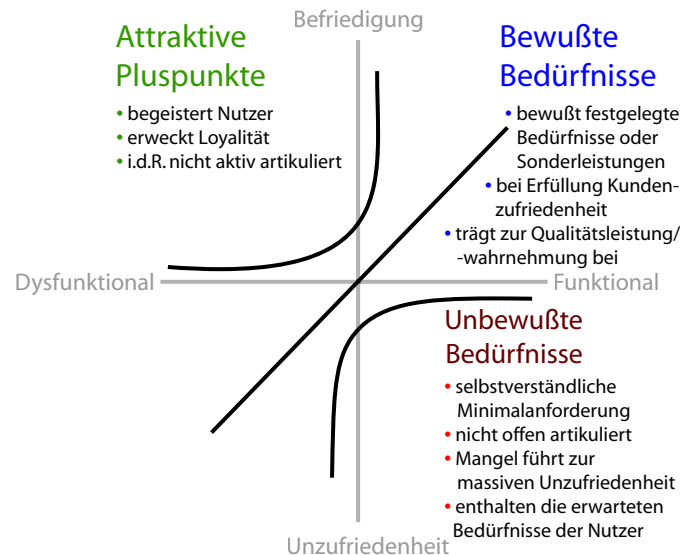


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Kano-Modells[109]

Iring Koch[102] beschreibt eine mögliche Folge von Diskomfort: Streß. Stressoren sind Einflüsse auf Informationsverarbeitung und Denken, die der zu verarbeitenden Information nicht inherent sind. Koch macht folgende Einflüsse für Streß verantwortlich:

- | | |
|---------------------------|---------------------|
| • Geräuschpegel | - Dunkelheit |
| • Vibration | - Helligkeit |
| • Temperatur | • Beschleunigung |
| - Hitze | • Schlafmangel |
| - Kälte | • Zeitdruck |
| • Beleuchtungsbedingungen | • Kummer und Sorgen |

Zeitdruck ist ein Kriterium, das in verkehrsreichen Bahnhöfen eine wichtige Rolle spielt. Verspätungen sowohl von Zügen als auch von ankommenden Reisenden, schnelles Umsteigen und das dichte Gewirr von Personen sorgt sowohl bei Bahnkunden als auch -mitarbeitern für Streß.

Streß wirkt sich negativ auf die Informationsverarbeitung der betroffenen Personen aus, wodurch ein sich selbst verstärkender Kreislauf von immer mehr Streß entstehen kann:

- Selektive Aufmerksamkeit: Verengung („Tunnelblick“)
- Erhöhte Ablenkbarkeit
- Reduzierte Gedächtnisspanne
- Reduziertes Situationsbewußtsein
- Reduzierte Problemlöse- und Entscheidungsfähigkeit
- menschliche Fehlleistungen
 - Unfälle
 - Unglücke

Wohlbefinden kann auf Komfort rückzuführen sein, muß aber nicht. Als Beispiel sei hier das Wohlbefinden nach der Ausübung von Sport genannt, das umso höher ist, je weniger die körperliche Anstrengung durch komfortable Geräte gedämpft wird. Komfort kann sogar zu Langeweile führen, ein Überfluß an Komfort ist daher negativ zu bewerten. Auch könnte die zu hohe Komfortausprägung eines Produktes bei dem Käufer das Gefühl verursachen, daß er dafür mehr bezahlen muß als für die Funktion eigentlich nötig wäre.

Maslow (1954) und Rogers (1951, beide zitiert in [21]) betonen in ihren Selbstaktualisierungstheorien das Streben des Menschen nach Entfaltung seiner Anlagen sowie nach persönlicher Reifung. Ein zu hohes Niveau an Komfort könnte also vor allem junge Menschen daran hindern, ihre Fähigkeiten und Denkmuster voll zu entfalten.

Nach Scitovsky (1977, ebenfalls zitiert in [21]) erzeugt Komfort Behagen, trägt aber nicht zur Lust bei - kann diese sogar verhindern. Zuviel Komfort ist nach seiner Auffassung schädlich, weil dadurch das Bedürfnis nach Anregung und Neuigkeiten behindert wird.

Kosten und Nutzen

Kosten und Nutzen von Komfort sind nicht zwei Seiten derselben Medaille, da Komfortsteigerungen nicht unbedingt mit höheren Kosten erkaufte werden müssen, und höhere Kosten nicht zwangsläufig zu höherem Komfort führen. Daraus folgt: Es gibt auch negative Kosten oder negativen Nutzen[2].

Kosten bestehen aus

- Finanziellem Aufwand (direkt meßbar)
- anderen Anstrengungen oder Einbußen

Nutzen besteht aus

- Mehr Produktivität
- Niedrigeren Kosten
- Höherer Qualität
- nicht quantifizierbaren Vorteilen

Kosten / Nutzen					
Finanzieller Aufwand (direkt meßbar)	andere Anstrengungen oder Einbußen		Sicherheit	Leistung	Werte, Image
	Gesundheit	Verantwortung, Rechtsverbindlichkeit			
Investitionen	Gesundheits- beschwerden	Prozesskosten	Sicherheitsverhalten	Produktivität	
Betriebskosten	Rehabilitations- maßnahmen	Anwälte	Unfälle	Markteinführungszeit Lieferzeiten	
Wartung & Instandhaltung	Behinderungen	Strafen		Personaleinsatz	
Raum	Versicherungen	Entschädigungen		Produzierte Güter	
Energie	Krankheitstage			Service Level	
Steuern				Qualität	
Personalkosten				Flexibilität	
Zinsen					
<div> <div>NUTZEN: mehr Produktivität, niedrigere Kosten, höhere Qualität, nicht quantifizierbare Vorteile</div> <div>KOSTEN: finanzieller Aufwand (direkt meßbar), andere Anstrengungen oder Einbußen</div> </div>					

Abbildung 3.3: Kosten und Nutzen von komfortsteigernden Maßnahmen

Dabei sollten die in Abbildung 3.3 dargestellten Aspekte berücksichtigt werden.

Vink kommt zu dem Schluß, daß die Nutzbarkeit und damit auch die *Funktionalität* eines technischen Produktes davon abhängt, wie zielführend und effektiv es ist, aber auch davon, wieviel Befriedigung es seinem Nutzer schenkt.

3.1.3 Funktionalität

Der Begriff „Funktionalität“ soll an dieser Stelle nur durch ein lexikalisches Zitat definiert werden, da eine Literaturrecherche zu Funktionalität in allen relevanten Lebensbereichen und Industrien den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Die Funktionalität von Bahnhöfen wird in den Abschnitten 1.3, 2.1 und 3.5 näher erläutert.

Auf Wikipedia[132] ist über den Begriff „Funktionalität“ zu lesen:

Funktionalität „bezeichnet in der Technik und besonders in der Informatik die Fähigkeit eines Produktes oder einer Komponente, eine bestimmte Aufgabe oder Menge von Aufgaben zu lösen. Dies bezieht sich vor allem auf das grundlegende Funktionsprinzip. Die Funktionalität ist zu unterscheiden von einer Einzelfunktion [...]“

3.1.4 Energieverbrauch

Zur Messung von Energieeffizienz wird die in einem System verbrauchte Energie häufig in Relation gesetzt, z.B. zur Nettogrundfläche eines Gebäudes, zu Personennutzungsstunden², zum

²Produkt aus Anzahl der Personen und Anzahl der Nutzungsstunden[109]

erreichten Komfortniveau oder zu gewissen funktionellen Eigenschaften. Das heißt, in der Betrachtungsweise wird ausschließlich der Nenner variiert. Offen bleibt die Frage nach dem Zähler, also dem *Energieverbrauch*. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik [14][20] ist die Gesamtenergie in einem geschlossenen System immer gleich. Somit dürfte ein idealisiert adiabatisch geschlossenes System gar keine Energie verbrauchen können, ebenso wenig wie beispielsweise Gebäude im Sommer, die durch die starke solare Einstrahlung einen Energieüberschuß verzeichnen. Dennoch verbrauchen Gebäude auch im Sommer zusätzliche Energie, nämlich um genau diesen Überschuß an Wärmeenergie wieder aus dem System Gebäude nach außen zu transportieren. Die reine Bilanzierung von „Stoff- und Energieströmen“ [109] führt also nicht ans Ziel.

Energie ist in jedem realen System enthalten. Allerdings ist Energie nicht in jeder Form *nutzbar*. Daher spricht man in der Thermodynamik [14][20][109] von dem nutzbaren Anteil *Exergie* und dem nicht nutzbaren Anteil der Energie, der *Anergie*. Der Vorgang, der gemeinhin aber sachlich falsch als „Energieverbrauch“ bezeichnet wird, ist in Wahrheit eine Umwandlung von Exergie in Anergie, wobei die Menge Energie konstant ist.

Exergie ist also Energie, die in einem chemischen, thermodynamischen, elektrischen oder potentiellen Gefälle gespeichert ist. Anergie ist der Anteil der Energie, der mit seiner Umgebung in einem Gleichgewicht steht und daher nicht für Arbeit benutzbar ist. Bei der Umwandlung von Exergie in Anergie entsteht *Entropie*. Entropie ist ein Maß der Unordnung bzw. der gleichmäßigen Verteilung als Gegenteil eines Vorhandenseins thermodynamischer Gefälle. Bei jedem thermodynamischen Prozeß entsteht Entropie, da neben der gewünschten Arbeit auch Prozeßwärme entsteht, die sich gleichmäßig in der Umgebung verteilt und als Anergie nicht mehr dem System als potentielle Arbeit zur Verfügung steht. Es ist zwar möglich, in einem Subsystem die Entropie zu verringern, z.B. beim Erzeugen von Temperaturgefällen in einer Küche durch den Betrieb von Kühlschränken oder eines Ofens. Allerdings entsteht dadurch in dem übergeordneten System mehr Entropie als in dem Subsystem vernichtet wird. Das übergeordnete System wäre in dem genannten Beispiel die gesamte Umwelt, darin das Netz zur elektrischen Energieversorgung und vor allem das Kraftwerk, das neben Strom auch jede Menge Entropie erzeugt.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, daß in einem abgeschlossenen System die Entropie weder sinken noch konstant bleiben kann, sondern ständig steigt. Das heißt, daß auch ständig Exergie in Anergie verwandelt wird. Diese Feststellung ist gleichbedeutend mit der Erkenntnis, daß thermodynamische Prozesse nicht reversibel ablaufen können.

Einflußgrößen auf den betrieblichen Energiebedarf

Kruska[65] und die Projektgruppe INNOSEG[109] definieren und erläutern die zentralen Begriffe, die zum Verständnis der energetischen Abläufe in der Energiewirtschaft notwendig sind:

Primärenergie ist die Bezeichnung für „die natürlich vorkommenden Energieformen (z.B. Rohöl, Uranerz, Waldholz, Sonnenstrahlen und Wind), die noch keiner technischen Umwandlung unterworfen wurden. Es handelt sich in der Regel um Strahlungs-, kinetische-, chemische oder nukleare Energie.“

Bei der Bilanzierung des Primärenergieeinsatzes sollte die Nutzung von solaren Gewinnen sowie die Tageslichtnutzung als „vermiedene konventionelle Energie“ mit aufgenommen werden. Noch

darüber hinaus geht die Erzeugung von Strom im Gebäudekontext und dessen Einspeisung in das öffentliche Netz. Da die erneuerbaren Energiequellen Sonnenstrahlung und kinetische Windenergie wetter- und nicht bedarfsabhängig sind und nach heutigem Stand der Technik nur ineffizient gespeichert werden können, werden sie auch als „stochastische Energiearten“ bezeichnet[109].

Endenergie ist die Energieform, die nach der Umwandlung von Primärenergie entsteht und transportiert und für den Betrieb technischer Anlagen eingesetzt werden kann. Dazu gehören elektrische Energie, gasförmige und flüssige Energieträger wie Erdgas, Ferndampf, Heizöl; seltener feste Brennstoffe wie Kohle und Biomasse.

Nutzenergie ist die Energie, die von einer technischen Anlage für den eigentlichen Zweck der Anlage verwendet wird und nicht in prozeßbedingte Abwärme umgewandelt wird. Dazu gehören Leuchten, Wärmen, Bewegungen, Kühlen und Steuern.

Wirkungsgrad ist der Anteil der Nutzenergie in Bezug zur eingesetzten Endenergie.

Die Effizienz der Umwandlung von End- in Nutzenergie hängt von den Einzeleffizienzen der Schritte Umwandlung, Antrieb, Transport, Bereitstellung und Übergabe ab[109].

Umwandlungsverluste treten auf, wenn mit den Abgasen, Brennstoffen oder Abstrahlungen dem System auch Wärme verloren geht.

Transportverluste treten auf, wenn ein Temperaturgefälle zwischen flüssigen Medien in Rohrleitungen und der Umgebung auftreten und die Rohre schlecht gedämmt sind.

Antriebsverluste bezeichnen den Energieverbrauch von Anlagen wie Pumpen oder Ventilatoren, die ihrerseits Stoff- und Energieströme in Bewegung setzen.

Bereitstellungsverluste treten bei einem zeitlichen Versatz zwischen der Umwandlung von Energie und der tatsächlichen Nutzung auf. Bekannte Beispiele sind hier die Bereitsstellung von Warmwasser in einem Boiler, die zu frühe Aufheizung eines noch nicht genutzten Raumes oder die späte und zu schnelle Aufheizung eines bereits in der Nutzung befindlichen Raumes.

Übergabeverluste entstehen bei hohen Potentialdifferenzen zum Beispiel bei Vorlauftemperaturen von Heizungen.

Bereitstellungsgrad ist der Anteil der Endenergie im Bezug zur eingesetzten Primärenergie. Nach Drake (1996, zitiert in [65]) und Hausladen [79] haben folgende Energieträger nachfolgende Bereitstellungsgrade³ π :

Energieträger	π_{min}	π_{max}	$1/\pi$
Elektrizität	0,32	0,35	3,00
Erdgas ⁴	0,90	0,91	1,10
Heizöl	0,88	0,91	1,15
Brennholz	0,95	0,96	1,05
Wasserstoff	0,80	0,85	1,20

Nach [109] ist der Faktor $\frac{1}{3}$ als Bereitstellungsgrad bei der Erzeugung von Strom zu unscharf, da diese Verrechnung keinen Anreiz bietet, umweltfreundlich erzeugten Strom einzusetzen. Bei

³Der Kehrwert des Bereitstellungsgrades wird als *Primärenergiefaktor* bezeichnet

⁴oder Flüssiggas

der Beurteilung der Energieeffizienz durch die reine Betrachtung des Primärenergieeinsatzes wird außerdem die Nutzung von erneuerbaren Energien vernachlässigt.

3.2 Komfort unterschiedlicher Verkehrsmittel und Reiseketten

Neben Preis und Reisedauer spielt Komfort heutzutage eine entscheidende Rolle für die Wahl des Verkehrsmittels. Dies zeigt die große Anzahl an Forschungsarbeiten und Publikationen auf dem Gebiet der Komfortoptimierung für Kraftfahrzeuge und Flugzeuge. Bei durchschnittlichen Zug- wie auch Flugreisen findet ein erheblicher Teil der Reisekette in den Bahnhöfen bzw. Flughäfen statt. Merkwürdigerweise beziehen sich Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen hinsichtlich Komfortoptimierungen bei beiden Reiseketten hauptsächlich auf die Verkehrsmittel, also Züge und Flugzeugkabinen, und nicht auf die Bodenstationen. Komfort in Flugzeugen und Flughäfen untersucht Konieczny 2001, zitiert in [6]. Der Komfort in Personenbahnhöfen soll in dieser Arbeit näher betrachtet werden.

Bei dem Vergleich des Komforts und der Energieeffizienz zwischen Gebäuden und anderen Industriegütern wie Kraftfahrzeugen darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, daß praktisch jedes Gebäude[109]

- Unikatcharakter besitzt, während Fahrzeuge in Serien von großer Stückzahl gebaut werden
- eine höhere Komplexität besitzt als die meisten auf dem Markt befindlichen Konsumgüter
- eine höhere Lebensdauer besitzt als Konsumgüter

3.2.1 Funktionelle Unterschiede verschiedener Reiseketten

Preis, Reisedauer und Komfort beeinflussen maßgeblich die Wahl der Verkehrsmittel. Hinzu kommen weitere Aspekte wie Sicherheit und Unfallrisiko, gesundheitliche Verträglichkeit, ökologische Aspekte wie spezifischer Energieverbrauch und CO_2 -Ausstoß oder die lokale Verfügbarkeit. Jedes der drei hier betrachteten Verkehrsmittel Privatkraftfahrzeug, Flugzeug und Zug hat allerdings auch systembedingte Vor- und Nachteile.

Personenkraftwagen

Private Personenkraftwagen haben im Gegensatz zu öffentlichen Verkehrsmitteln den Vorteil, daß sie eine „Tür-zu-Tür“-Verbindung darstellen. In der Regel ist kein Umsteigen erforderlich. Dadurch werden die gegenüber Zügen und vor allem Flugzeugen niedrigeren Spitzengeschwindigkeiten in vielen Fällen kompensiert. Personenkraftwagen ermöglichen absolut individuelle Reiserouten und sicheren Stauraum für Gepäck. Die Strapazen langer Autofahrten in den Urlaub werden durch das Vorhandensein eines Autos am Urlaubsort gerechtfertigt. Die Alternativen sind unter Umständen sehr kostspielig: Mietauto oder Taxi vor Ort, oder den eigenen PKW auf einem Autozug oder Schiff vorschicken. Mit einem Auto sind spontane Fahrten zu jeder Uhrzeit möglich. Gerade in der Nacht bietet ein Auto auch Schutz vor Gefahren durch kriminelle Menschen. Da der Autoverkehr im Gegensatz zum Zug- oder Flugverkehr nicht durch bindende Verkehrsleitsysteme reguliert wird, können sehr leicht Stauerscheinungen und Unfälle auftreten. Negativ zu bewerten

ist sicherlich auch die hohe Anfälligkeit gegenüber Schnee und Eisglätte, sowie die Tatsache, daß ein sehr hoher Anteil der Reisenden selbst ein Fahrzeug steuern muß und seine Aufmerksamkeit nicht anderen Dingen widmen kann. Selbst Beifahrer sind häufig nicht in der Lage, während der Autofahrt zu lesen oder zu arbeiten. Die ökologische Bilanz eines Personenkraftwagens hängt davon ab, wie stark das Auto ausgelastet ist, d.h. wie viele Insassen gleichzeitig in einem Fahrzeug unterwegs sind. Fahrten mit dem PKW schließen die Reservierung oder möglicherweise zeitaufwendige spontane Suche nach Parkplätzen am Zielort mit ein. Außerdem müssen PKW-Fahrer selbst sicherstellen, daß genügend Kraftstoff für das Erreichen des Ziels vorhanden ist.

Flugzeuge

Der größte Vorteil des Flugzeugs ist sicherlich seine hohe Geschwindigkeit, die von bodengebundenen Verkehrssystemen nicht erreicht wird. Die hohe Geschwindigkeit wirkt sich aber erst dann positiv auf die Gesamtreisedauer aus, wenn die Flugdistanz hoch genug ist, um die hohe Verweildauer in Flughäfen zu kompensieren. Nachteile des Systems Flugzeug sind aber die mangelnde Spontaneität, Flugtickets müssen praktisch immer im Voraus gebucht werden, und die sehr zeitaufwendigen Sicherheitsprozeduren in Flughäfen. Flugreisen beginnen und enden in Flughäfen. Da die meisten Menschen nicht in Flughäfen wohnen, finden Flugreisen so gut wie nie singulär statt, sondern haben eine vor- und nachgelagerte Reisekette, die ebenfalls organisiert und finanziert werden muß. Flugreisen kommen daher auch nicht ohne Umsteigevorgänge aus. Die Tatsache, daß Gepäck „eingescheckt“ werden muß, kann je nach Situation vorteil- oder nachteilhaft gegenüber dem persönlichen Gepäcktransport in Autos oder Zügen sein. In den meisten Fällen erfordert das Einchecken aber ein besonders frühes Erscheinen im Flughafen und langes Anstehen. Die Gepäckmenge ist in der Regel begrenzt, Übergepäck wird mit Aufpreis versehen. Insbesondere lassen sich große und empfindliche Musikinstrumente oder Tiere mit Flugzeugen nur schlecht oder aber teuer transportieren.

Eisenbahnen

Der große Vorteil des Systems Bahn gegenüber dem Flugverkehr ist neben der höheren Flexibilität vor allem die Nutzbarkeit der Reisezeit und die effizientere Abwicklung des Ein-, Aus- und Umstiegs in Bahnhöfen gegenüber Flughäfen. Hinzu kommt, daß es während des Aufenthaltes in Zügen und Bahnhöfen möglich ist, zu lesen, arbeiten, telefonieren, essen oder zu schlafen, was bei Reisen mit dem Flugzeug nur während des Fluges oder des Wartens in Flughäfen möglich ist. Vorteile des Zug- wie auch Flugverkehrs liegen in der ständigen Verfügbarkeit von Toilettenanlagen und der Möglichkeit, sich während der Fahrt die Beine vertreten zu können. Die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit hängt stark davon ab, wie weit Start- und Zielpunkt entfernt liegen von Eisenbahnknotenpunkten mit Hochgeschwindigkeitszügen oder schnellen Regionalverkehrsverbindungen. Reisen in oder aus ländlichen Gebieten werden mit dem öffentlichen Verkehr schnell sehr umständlich und zeitraubend. Ein weiterer Nachteil des Zugverkehrs ist das zumeist sehr ausgedünnte Verkehrsangebot nachts, sowie ein gewisses Risiko, bei Verspätungen in vorgelagerten Zügen Anschlußverbindungen nicht mehr erreichen zu können und dann lange Zeit auf Bahnhöfen ausharren zu müssen.

Komfortklassen

Züge und Flugzeuge verfügen in der Regel über verschiedene Komfort- und Preisklassen. Im Zugverkehr gibt es Bereiche der ersten und der zweiten Klasse, die sich preislich aber nicht so stark unterscheiden wie die drei Klassen beim Flugverkehr. Im Reisebusverkehr gibt es keine Zonierung *innerhalb* der Fahrzeuge, sondern unterschiedliche Busse der 1. und 2. Klasse. Auch im Autoverkehr gibt es Preis- und Komfortklassen, die allerdings bei der Anschaffung eines Automobils bereits festgelegt wird. Geschwindigkeitsvorteile haben höherwertige Autos nur auf langen Fahrten ohne Stau. Im Stadtverkehr und auf vielbefahrenen Autobahnen limitiert die allgemeine Verkehrslage die Höchstgeschwindigkeit. Die große Masse der Bahnhöfe besitzt keine Komfortzonen für 1. Klasse Kunden. Lediglich große Bahnhöfe an Knotenpunkten wie Frankfurt, München oder Köln besitzen eine 1. Klasse Lounge, die aber nicht 24 Stunden am Tag geöffnet ist. Die Hauptbahnhöfe in Hamburg und Berlin verfügen sogar über einen Premiumbereich innerhalb der 1. Klasse Lounge.

Kombination der Verkehrsmittel

Die einzelnen Vorteile der Verkehrsmittel lassen sich miteinander kombinieren und so gesamte Reiseketten optimieren. Angesichts des hohen Marktanteils des reinen motorisierten Individualverkehrs liegen mit Sicherheit noch einige Potentiale in der Verzahnung verschiedener Verkehrsträger, was sowohl den Kundennutzen als auch die Auslastung der Infrastruktur verbessern könnte. Solche *hybriden* Reiseketten wären stark durch den Wechsel der Verkehrsmittel geprägt. Diese Wechsel würden zu einem hohen Anteil in Bahnhöfen, Flughäfen und Parkräumen stattfinden. Um Reisende dazu zu bewegen, hybride Reiseketten zu nutzen, müßte in jedem Fall ein homogenes Funktions- und Komfortniveau während der gesamten Reise vorherrschen, also ein durchschnittlich hohes Niveau bei niedriger Varianz. Auch die Ein- und Umsteigestationen zwischen den Verkehrsmitteln bräuchten ein Niveau, welches den bewegten Verkehrsmitteln nicht nachsteht. Der Komfort alternativer Verkehrsmittel wird in den nächsten Abschnitten näher betrachtet.

3.2.2 Komfort bei Flugzeugen

Personenverkehr mit Großraumflugzeugen besteht ähnlich wie Zugreisen aus verschiedenen Gliedern einer Mobilitätskette. Beim Flugverkehr sind das in der Regel die in Abbildung 3.4 dargestellten Punkte:

Anreise zum	Aufenthalt im	Tatsächlicher	Transfer zum
	Flughafen	Flug	Zielpunkt
	Check-In	Start	
	Sicherheitskontrollen	Flug	
	Paßkontrolle	Landung	
	Warten		
	Verkehrswege zu Fuß		

Abbildung 3.4: Mobilitätskette im Flugverkehr

Reinhard Weber und Michael A. Bellmann[3] identifizieren drei grundlegende Komfortparameter in Flugzeugkabinen:

<i>Meßgrößen</i>	<i>Komfortparameter</i>
Schall und Vibration	Qualität der Geräuschumgebung
Lufttemperatur	Thermische Behaglichkeit
Sitzkenngrößen	Sitzkomfort

Tabelle 3.3: Komfortparameter in Flugzeugkabinen

Eine in Kanada durchgeführte Untersuchung (zitiert in [6]) identifiziert folgende Stellgrößen für die Modellierung des Komforts in Flugzeugen:

- Nutzerakzeptanz
- Technische Herausforderungen
- Operationelle Herausforderungen
- Regulatorische Herausforderungen
- Flugbewegungen
 - laterale und vertikale Beschleunigung
 - Schwingungen
 - Turbulenzen
- Kabinenlärm
- Vibrationen
- Flugmanöver
- Druck
- Temperatur
- Sitzkomfort (Ergonomie)
 - Sitzbreite
 - Beinfreiheit
 - *Weitere ergonomische Parameter bleiben unberücksichtigt*
- Im Langstreckenverkehr: Entertainment
- Serviceeinrichtungen
- Kabinengröße
- Aussicht
- Kinetoseerscheinungen (Luftkrankheiten)

Konieczny untersucht in seiner Dissertation „Kundenorientierte Flugzeugentwicklung“, aus dem Jahre 2001 (zitiert in [6]) auch den vor- und nachgelagerten Komfort der gesamten Reisekette, also auch den Komfort von Flughäfen. Dabei stößt er auf folgende Parameter:

- Toiletten
- Hygiene
- Service
- Speisen
- Image
- Umweltfreundlichkeit

Peter Vink [2] hat in seiner Studie zur Zielgröße Komfort im Produktdesign⁵ ein Modell zur Beurteilung von Komfort in Flugzeugkabinen entwickelt, in dem es vor allem um die Vermeidung von Störgrößen, also Diskomfort geht:

- Thermischer Komfort
 - Trockene Luft
 - Kalte Füße
 - Luftzug
- Akustischer Komfort
 - Lärm
- Visueller Komfort
- Physischer Komfort
 - Beinfreiheit
 - Bildschirmposition
 - Bewegungsfreiheit
- Vibrationen / Stöße
- Sinneswahrnehmung
- Schmerz

Richards und andere (1978, zitiert in [4]) zeigen, daß Flugzeugkomfort von der Crew höher bewertet wird als von den Fluggästen, da ihre Aufmerksamkeit auf andere Bedingungen fokussiert sind, wie z.B. den Flugverkehr, die Instrumente für die Navigation sowie die mobilen Catering-Einrichtungen, mit denen sie ihre jeweilige Tätigkeit nachgehen.

Gemeinschaftlicher Kabinen- und individueller Sitzkomfort

Komfort spielt sich in Flugzeugen in zwei verschiedenen Dimensionen ab. Zum einen der Komfort der gesamten Kabine, dessen Niveau sich alle Insassen und Personal teilen. Im Gegensatz dazu gibt es den Sitzkomfort, der bei jedem Fahrgast individuell verschieden ausgeprägt sein kann.

Krist [10] differenziert Diskomfort beim Sitzen in einem Flugzeug als Funktion der Sitzdauer:

- Ansitz-,
- Kurzzeit- und
- Langzeitdiskomfort

und unterschiedlicher Lastverteilung auf

- Gesäß,
- Mittlere Oberschenkel und
- Vordere Oberschenkel

Arnd Friedrichs und Steffen Adler analysieren in [4] den Langzeitsitzkomfort in verschiedenen Mobilitätskonzepten, also sowohl in Flugzeugen, Personenkraftwagen und Zügen. Sie kommen dabei zu dem Ergebnis, daß Reisende während der Fahrt Mikro- und Makrobewegungen machen. Mikrobewegungen sind passive Bewegungen, die auf Vibration, Schaukeln und Kurven in der Bewegungsrichtung zurückzuführen sind. Diese Bewegungen sind der Auslöser von Diskomfort. Die Makrobewegungen hingegen sind Reaktionen des menschlichen Körpers auf den durch Mikrobewegungen ausgelösten Diskomfort und äußern sich in der Veränderung der Körperhaltung.

Für verschiedene Layoutvarianten von Flugzeugkabinen existieren folgende Parameter:

- Bestuhlungspläne
- geometrische Abmessungen der Sitzplätze
- Anzahl und Platzierung der Serviceeinrichtungen
 - WC
 - Wartebereiche
- Kabinenumgebungsbedingungen
 - Temperatur
 - Feuchtigkeit
 - Druck
 - Vibration
 - Licht
 - Lärm
 - Kombination der obigen Faktoren
- Drei Komfortklassen:⁶

⁵siehe auch Abschnitt 3.1.2 auf Seite 41

⁶Siehe auch Abschnitt 3.2.1

- Economy
- Business
- First

Wittmann[6] betrachtet die Bewertungskriterien über die Gesamtkabine und die Einzelplätze in seiner „Matrix der Einflußfaktoren“ (Abbildung 3.5) je aus Sicht der Passagiere und der Airline.

Perspektive		
Bewertungsobjekt	Passagier	
	Airline	
	Einzelplatz	Gesamtkabine
	Distanz zu Geruch aus Lärm aus Entertainment Außensicht Ergonomie	Serviceeinrichtungen -
	Kabinenlayout Flugbewegungen Angebot und Anzahl an Serviceeinrichtungen Umwelt	Turn - Around - Zeit Kosten

Abbildung 3.5: Matrix der Einflußfaktoren

3.2.3 Komfort bei Personenkraftwagen

Im Gegensatz zu Reisen in Flugzeugen oder Zügen, bei denen die Reisenden die Fahrzeuge nicht selbst steuern, gibt es im motorisierten Individualverkehr mindestens einen Reisenden, der auch selbst Fahrer ist. Auf diesen beziehen sich in der Regel die Komfortuntersuchungen in den Publikationen, die sich mit Komfort in Kraftfahrzeugen beschäftigen.

Olaf Kempfer untersucht in [21] gängige Meßmethoden für Komfort bei Verkehrsmitteln. Die bis zum Zeitpunkt seiner Publikation existierenden Methoden sind zum überwiegenden Teil Studien über einzelne Fahrzeugmerkmale oder singuläre Einflußgrößen, die im experimentellen Kontext untersucht werden. Die Existenz bzw. Intensität einer Störgröße wird zur Messung der Komfortbeeinträchtigung herangezogen. Komfort wird dabei als Zustand physischer Beschwerdefreiheit definiert. Die am häufigsten untersuchten Komfortdeterminanten dabei sind:

- Bewegungsvariablen
- Vibration, Schwingungen
- Sitz- und Raumvariablen
- Ventilation
- Geräusche

In einer Interviewstudie untersucht Metzger (zitiert in [21] 1994, unveröffentlichte Diplomarbeit FU Berlin) das Komfortverständnis bei Kraftfahrern und stößt dabei auf die in Abbildung 3.6 dargestellten Variablen.

Komfort Auto				nicht
physische Beschwerdefreiheit	Bequemlichkeit	Effizienz	Individualität	Wohlstand
Lärm	Entlastung	Aufgaben	Ausdruck eigener	
Temperatur	Entspannung	Handlungen	Persönlichkeit	
Helligkeit	meistens passiv	Automatisierung	Gestaltungsmöglichkeit	
Ergonomie	träge Anpassung			

Abbildung 3.6: Komfort bei Personenkraftwagen

Nach [24] sind in erster Linie folgende Faktoren für den Komfort im Auto verantwortlich:

- Lärmschutz
 - Reifengeräusche
 - Windgeräusche
 - Umgebungsgeräusche
- Hitzeschutz
- Gewicht des Fahrzeugs

Thermische Behaglichkeit

Han, Zhang und andere messen in ihrer Studie über den Kabinenkomfort eines Autos [116] thermische Behaglichkeit anhand folgender Größen:

- Physikalische Faktoren
 - Luftgeschwindigkeit im Auto
 - Glastemperatur
 - Temperatur der Innenoberflächen
 - Solarstrahlung und Glastyp
 - Bestrahlungswinkel
- Menschliche Faktoren
 - Kleidung
 - Durchblutungseigenschaften

Die klimatische Regelung in einem Auto ist in der Regel nur dann aktiv, wenn das Auto tatsächlich fährt und elektrische Energie über die Lichtmaschine gewonnen wird. Das bedeutet aber, daß die thermischen Konditionen zu Beginn einer Fahrt häufig sehr unbehaglich sind, und erst sehr spät oder bei kurzen Fahrten überhaupt kein akzeptables Niveau erreichen. Stefan Schlott untersucht in [5] die Befriedigung des Komfortbedürfnisses vieler Autofahrer durch Standheizung und ermittelt dabei einen vielfältigen Nutzen:

- Thermischer Komfort
 - relative Feuchte der Umgebungsluft
 - Temperatur
 - Luftbewegung
 - unterschiedliche Auswirkungen auf einzelne Körperzonen
 - Bei -5°C kann es 20min dauern, bis sich im Fahrzeug eine akzeptable Temperatur einstellt
- Scheibenkratzen im Winter
- Motorvorwärmung, Abgasverbesserung auf den ersten Kilometern

Sitzkomfort

Renate Krist [10] bestätigt in ihrer Forschungsarbeit über die „Modellierung des Sitzkomforts“ in Fahrzeugen die ebenfalls von Vink[2]⁷ vertretene These, Komfort und Diskomfort seien nicht disjunkt, also auch nicht die positive bzw. negative Ausprägung ein und derselben Größe.

Sie definiert folgende für die Messung von Komfort relevanten Begriffe:

Belastung Einflüsse, die meßbar oder nicht objektiv meßbar sind. Es gibt eine Belastungshöhe H und eine Belastungsdauer T .

Beanspruchung ist im Gegensatz zur Belastung subjektiv und individuell verschieden

Aerodynamik von Automobilen

Seyd Rafeey Ahmed beschäftigt sich in [12] mit der Aerodynamik von Automobilen, einem der entscheidendsten Parameter für den Komfort und die Energieeffizienz von Personenwagen.

Bei der Betrachtung von aerodynamischen Vorgängen sind drei Kategorien zu unterscheiden:

- Umströmung des Fahrzeugs
- Durchströmung der Karosserie
- Strömungen innerhalb der Aggregate

Direkt bekommt der Fahrer eines Autos vor allem die Umströmung des Fahrzeugs zu spüren. Entweder als Stöße bei geschlossenem Innenraum oder als tatsächliche Luftströmung bei undichten oder geöffneten Fenstern. Einen direkten Kontakt mit den hochturbulenten Ablösungsströmungen bekommen Fahrzeuginsassen vor allem dann, wenn das Verdeck oder das Schiebedach während der Fahrt geöffnet ist.

Neben der direkten Wirkung können turbulente Strömungen aber auch einen indirekten Einfluß auf das Komfortempfinden der Passagiere haben, sowohl akustisch als auch visuell. Als besonders unangenehm wird das sogenannte „Bauteilflattern“ empfunden, die periodische Verformung von Bauteilen am Fahrzeug. Starke, turbulente Strömungen haben aber nicht nur Auswirkungen auf den Komfort, sondern auch auf die Sicherheit und die Funktionalität des Kraftfahrzeugs.

Komfort und Zeit

Die Dauer des Aufenthalts in einem Fahrzeug ist von entscheidender Bedeutung für das Empfinden von Komfort⁸. Die in [10] zitierten Studien zeigen unterschiedliche Ergebnisse: Bei Untersuchungen von Wachler und Learner (1960) sowie Grandjean (1967) stellte sich bei den Probanden nach etwa 5 Minuten bereits dasselbe Komfortempfinden ein wie nach 4 Stunden. Bei Shackel und seinen Mitarbeitern (1969) ergab eine Komfortstudie zu Stühlen, daß eine signifikante Abnahme der Komfortbeurteilung nach etwa einer bis anderthalb Stunden stattfand. Die zeitliche Dynamik des Komfortempfindens ist also stark von der untersuchten Umgebung und von weiteren Randparametern (Störgrößen) abhängig.

⁷siehe auch Abschnitt 3.1.2

⁸siehe Abschnitt 3.6.4

Marketingaspekte

Ein wichtiges Ziel der technischen Entwicklung zugunsten mehr Komfort der Produkte ist es, den Kundennutzen zu erhöhen. Dadurch wird eine Basis dafür geschaffen, Gewinne auch in ungünstigen Wirtschaftsperioden nachhaltig zu steigern.

Die in Abbildung 3.7 aufgeführten Komfortmerkmale spielen nach Meschke und Thörmann [4] bei potentiellen Käufern von Automobilen eine wichtige Rolle.

Komfortmerkmale als Entscheidungskriterien für den Automobilkauf					
Bequemlichkeit	Wohlfühlen	Sicherheit	Zweckmäßigkeit	Stärkung	Luxus
geräumig	angenehm		einfach	Hilfe	Zusätze
groß	ruhig		unkompliziert	Entlastung	Extras
angenehm	entspannt		handlich	schnell	Design
warm	ästhetisch		funktional	zeitsparend	hoher Preis
geräuscharm	wohlriechend		an den Menschen angepaßt	Unterstützung durch Technik	angenommene hohe Wertigkeit
weich	körperlich / seelisch wohl		nicht anstrengend	automatisierte Funktionen	
geschmeidig	streßfrei		ergonomisch		
	schadensfrei				

Abbildung 3.7: Komfortmerkmale von Automobilen beeinflussen Kaufentscheidungen

3.2.4 Komfort in Zügen

Das Modell zur Messung der Passagierakzeptanz und des -komforts in bodengebundenen Verkehrsmitteln, welches Suzuki et al im Jahr 1998 nach einer Befragung von über 2000 Reisenden in japanischen Fernzügen erstellt haben, beinhaltet folgende zu optimierende Faktoren [6]:

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Vibration • Lärm • Helligkeit • Geruch • Design der Kabine • Sitzkomfort • Sitzabstand | <p>Es fließen <i>nicht</i> ein:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Luftfeuchte • Luftqualität • Alter der Züge |
|--|---|

3.2.5 Auswertung

Die zitierten Arbeiten setzen sich mit dem Thema „Komfort“ in verschiedenen Verkehrsmitteln auseinander. Der Versuch, diesen Begriff eindeutig zu definieren, führt in der Regel auf die Suche nach *Parametern*, die für einen komfortablen Zustand verantwortlich sind oder ihn stören. Diese Parameter teilen sich auf in physikalische und damit meßbare Parameter als auch physiologische und psychologische Kriterien, die nicht mit technischen Geräten meßbar sind. Solche Parameter werden entweder durch Feldstudien und Befragungen in realen Situationen erhoben, oder in Laborversuchen und den Erfahrungsberichten menschlicher Probanden. Die Komfortkriterien der

beschriebenen Verkehrsmittel stimmen zu einem Großteil überein. Es gibt allerdings auch systemspezifische Parameter, die nur bei einzelnen Verkehrsträgern eine Rolle spielen. Besonders wichtig sind den Nutzern von Verkehrsmitteln offensichtlich thermischer Komfort, Lärmschutz und Sitzqualität, siehe Abbildung 3.8.

Gemeinsame Komfortkriterien Flugzeug, Auto, Zug	Flugzeug		Auto	Zug
	Individueller Komfort	Gesamtkomfort		
Thermischer Komfort	Entertainment	Kabinenlayout	Hitzeschutz	Helligkeit
Schall und Vibration	Aussicht Fenster	Druck	Ventilation	Stauraum für
Luftqualität		Luftkrankheiten	Licht	Gepäck / Fahrräder
Sitzkomfort		Hygiene	Bedienkonzepte	Verkehrsflächen
Raumangebot		Sauberkeit	Fahrzeuggewicht	für Ein- / Ausstieg
Aerodynamik		Speisen		Bordrestaurant
Sicherheit		Serviceeinrichtungen		
Design				
Prestige / Luxus				
Ökologie / Kraftstoffverbrauch				

Abbildung 3.8: Parametervergleich zu Komfort bei unterschiedlichen Verkehrsmitteln

Die Besonderheit beim Flugzeugkomfort besteht darin, daß es individuelle Parameter für jeden Fluggast gibt, aber auch eine große Anzahl von Einflußgrößen, die für die gesamte Flugzeugkabine gelten. Beim Kraftfahrzeugkomfort ist zu berücksichtigen, daß der Komfort hauptsächlich auf den Fahrer zugeschnitten ist. Bei öffentlichen Verkehrsmitteln sind Fahrer und Reisende unterschiedliche Personen und befinden sich während der Reise in abgegrenzten Fahrerkabinen.

Nachdem die Eingangsparameter für Komfort je nach Verkehrsmittel definiert sind, stellt sich die Frage nach der *Meßbarkeit* von Komfort. Die physikalischen Komfortbedingungen lassen sich mit geeigneten Meßgeräten *im laufenden Betrieb* messen. Die physiologischen und psychologischen Parameter jedoch nicht, daher werden diese aus den physikalischen Meßgrößen sowie Erhebungen und Korrelationsanalysen in der Vergangenheit statistisch ermittelt.

Dritter Schwerpunkt der Arbeiten sind Bewertungsschemata für Komfort. Diese sind nötig, um technische Systeme, die für den Komfort in Verkehrsmitteln verantwortlich sind, zu steuern und aufgrund von Komfortmessungen zu regeln.

Abschließend läßt sich sagen: Komfort bei Reiseketten

- ist weder Luxus noch Selbstzweck. Sowohl die Anbieter von Verkehrsdienstleistungen als auch Hersteller von Verkehrsmitteln optimieren Komfort, da Komfort ein Entscheidungskriterium der Kunden ist und somit Marktanteile sichert und vergrößert.
- ist ein Image- und Werbeträger. Einen Markennamen in weiten Teilen der Bevölkerung als Inbegriff für Komfort zu platzieren ist langwierig und mitunter schwierig, jedoch von ungeheurem Wert. Umgekehrt ist die allgemein verbreitete Verbindung einer Dienstleistung mit dem Begriff Diskomfort ein schwerwiegender Makel, der nur schwierig zu beseitigen ist und in einem umkämpften Wettbewerb zum Ausscheiden führen kann.
- mißt sich am Stand der Technik und an der Gewohnheit der Konsumenten. Steigt das allgemeine Niveau an Komfort bei den industriellen Produkten und Dienstleistungen, können

einzelne Sparten nicht auf ihrem Niveau verharren, sondern müssen mitziehen. Bei allgemeiner Verstärkung von Komfort wirkt die Komfortstagnation einzelner Bereiche relativ gesehen wie ein Rückschritt. Das heißt, was vor einigen Jahren noch als komfortabel gegolten haben mag, kann heute schon unbehaglich sein.

- bedeutet, daß die Reise- und Wartezeit effizient genutzt werden kann, sei es zum Arbeiten, Essen, Schlafen, Lesen oder Kommunizieren.
- unterstützt die Gesundheit und das Wohlbefinden der Kunden und der eigenen Mitarbeiter.
- bedeutet auch, selbst auf das Komfortniveau und die einzelnen Stellgrößen Einfluß nehmen zu können. So läßt sich Komfort beispielsweise über den Preis regeln.
- als marktwirtschaftliche Erfolgsgröße befindet sich im Spannungsfeld zwischen Serienproduktion bzw. Massenabfertigung und der Befriedigung individueller Bedürfnisse.
- setzt sich zusammen aus physikalischen Randbedingungen sowie den physiologischen und psychischen Eigenschaften jedes einzelnen Menschen, seiner Vorlieben, Gewohnheiten und Erwartungen.

3.3 Komfort in Gebäuden

Gebäude üben in erster Linie eine Schutzfunktion aus: Schutz vor Hitze, Kälte, Wind, Lärm, Regen und Schnee, aber auch Schutz vor ungebetenen Gästen wie Einbrechern oder wilden Tieren. Darüberhinaus haben Gebäude noch weitere Funktionen, wie etwa Statussymbol, Produktionsstätte, Ladenlokal oder Gewerbefläche für Dienstleistungen. Sind die funktionalen Grundvoraussetzung eines Gebäudes erfüllt, wie z.B. seine Standsicherheit oder hinreichendes Raum- und Platzangebot, kommt schnell die Frage nach dem Komfort auf.

Das Thema *Komfort in Gebäuden* ist sehr stark mit dem Begriff *Behaglichkeit* verknüpft. Georg W. Seunig schreibt in [93], daß Behaglichkeit auf vier verschiedene Art und Weisen auftritt:

- Lichtverhältnisse
- Hygiene
- Psychologische Reize
- Thermische Situation

Die DGNB⁹[138] führt für ihr Gütesiegel die in Tabelle 3.4 aufgelisteten Komfortkriterien ein.

Einen wesentlichen Einfluß auf die Behaglichkeit in einem Gebäude trägt die Gebäudehülle.

„Gebäude mit schweren Behaglichkeitsmängeln sind nachträglich nicht mehr durch Haustechnikmaßnahmen zu korrigieren“¹⁰.

Doch auch andere Architektonische Parameter wie Raumzonierung und strömungsmechanisches Verhalten spielen eine wichtige komfortrelevante Rolle.

Nach Richter [26] sind die Stellgrößen zur Optimierung des Komforts bautechnische Größen wie

⁹Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.

¹⁰Schweizer Ingenieur und Architekt, SIA Norm 180, Zürich, 2002, zitiert in [109]

Gesundheit, Behaglichkeit	Funktionalität	Gestaltung
Thermischer Komfort im Winter	Barrierefreiheit	Sicherung der
Thermischer Komfort im Sommer	Flächeneffizienz	gestalterischen
Innenraumhygiene	Umnutzungsfähigkeit	und städtischen
Akustischer Komfort	Zugänglichkeit	Qualität im
Visueller Komfort	Fahrradkomfort	Wettbewerb
Einflußnahme des Nutzers		
Gebäudebez. Außenraumqualität		
Sicherheit & Störfallrisiken		

Tabelle 3.4: Nachhaltigkeits- und Komfortkriterium, BMVBS-Leitfaden Nachhaltiges Bauen

- Wärmeschutzniveau
- Anzahl der Außenflächen
- Fensterflächenanteil
- Heizsystem
- Anordnung und Ausführung von Komponenten im Raum
- Luftwechsel

Die thermische Behaglichkeit spielt unter dem Gesichtspunkt *Energieeffizienz* die wichtigste Rolle und wird in dieser Arbeit am ausführlichsten behandelt. Hinzu kommt der Aspekt der Lichtverhältnisse, der neben den weiter unten diskutierten Problemstellungen wie Blendschutz und Mindestbeleuchtungsstärke auch schon den Aspekt der Fensterreinigung umfaßt. Hygiene und psychologische Reize spielen bei Bahnhöfen sicherlich eine sehr große Rolle, vor allem was Sauberkeit und Reinigung anbelangt. Diese beiden Punkte werden jedoch in der Literatur weitgehend vernachlässigt. P.O. Fanger erwähnt in seiner Arbeit [8], daß Staub und Gerüche zu den nicht-thermischen Einflußgrößen von Komfort gehören, vernachlässigt sie aber in seinem Komfortmodell. Psychologische Aspekte spielen beispielsweise eine Rolle, wenn in Gebäuden mit einem großen Glasflächenanteil oder sogar Oberlichtfenstern das Gefühl thermischer Unbehaglichkeit durch das bewußte positive Wahrnehmen der Sonne eines Schönwettertages verdrängt wird [94].

Viele Publikationen über den Komfort in Gebäuden behandeln in erster Linie Büro- und Wohngebäude.¹¹

Personenbahnhöfe haben unter zwei Gesichtspunkten Ähnlichkeiten mit Bürogebäuden. Zum einen werden sie vorwiegend tagsüber frequentiert, zum anderen befinden sich in Bahnhöfen auch Arbeitsplätze von Bediensteten der Deutsche Bahn AG oder anderen Dienstleistern. Der Länderausschuß für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI) [91] schränkt jedoch ein, daß „Arbeitsbereichsbeurteilungen an Kassenarbeitsplätzen und Info-Points der Deutschen Bahn AG [...] die Berücksichtigung unterschiedlicher Grenzwerte“ erfordern würde. Dennoch fordert die Arbeitsstättenverordnung von Betrieben, in denen das Arbeitsschutzgesetz gilt, daß in „Arbeitsstätten der Gesundheit der Beschäftigten zuträgliche Raumtemperaturen herrschen müssen [...]“.

Nach [95] sollte unterschieden werden zwischen Gebäuden *mit* oder *ohne Einfluß* des Nutzers auf das Raumklima. Die Möglichkeit der Einflußnahme ist in der Regel dann nicht gegeben, wenn

¹¹Siehe beispielsweise [1][22][26][89][35][105][46][47][48][49][106][50][51][52][58][109][67][78][79]

sehr viele Menschen sich in ein und demselben Raum aufhalten, oder wenn Räume sich hoch oben in Wolkenkratzern befinden und die Raumnutzer mangels Erfahrung aus dem privaten Umfeld die Windlasten und die Gefahr in der Höhe unterschätzen.

Laut Fanger[8] ist die intellektuelle, motorische und Wahrnehmungsleistung eines Menschen am höchsten, wenn er in einem Zustand thermischer Behaglichkeit ist. Oder anders ausgedrückt:

„Ein behagliches Raumklima fördert also nicht nur das Energiesparen, es kann auch mithelfen, Arztkosten zu sparen“ [93].

3.3.1 Thermischer Komfort - Temperatur

Jeder Mensch besitzt dieselben Regelmechanismen für die Reaktion auf bestimmte thermische Verhältnisse in der Umgebung. Allerdings unterscheiden sie sich individuell in ihrer Wirksamkeit. Aus diesem Grund gibt es nicht *das* optimale Raumklima. Die Beurteilung einer thermischen Situation unter Behaglichkeitskriterien ist daher eine statistische Größe.

Der thermische Komfort spielt neben dem visuellen Komfort die größte Rolle in der Komfortforschung. Im folgenden Abschnitt werden qualitativ die Parameter und Einflußgrößen für den Zustand thermischer Behaglichkeit beschrieben. Quantitative Modelle, basierend auf dem aus dem Jahre 1970 stammenden Komfortmodell von P. O. Fanger, werden in Abschnitt 3.6.4 beschrieben.

Menschlicher Wärmehaushalt

Thermische Behaglichkeit stellt sich ein, wenn:

- der Körper in einem thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung steht und
- das Umgebungsklima unserer Erwartung entspricht.

.

Der menschliche Körper besitzt eine Vielzahl an Möglichkeiten, auf die Temperatur in seiner Umwelt zu reagieren, vor allem, wenn diese von der körpereigenen Temperatur von etwa 37°C abweicht. Interessanterweise besitzt der Mensch zwei unterschiedliche Sinnesorgane, um mit seinen physiologischen Mechanismen auf Wärme oder Kälte zu reagieren: Das Wärmeempfinden wird durch die Warmrezeptoren im Stammhirn ausgelöst, das Kälteempfinden jedoch durch die Kaltrezeptoren in der Haut[33].

Das Wärmezentrum im Gehirn steuert den Wärmehaushalt des Körpers, siehe Abbildung 3.9.

Mit dem natürlichen Stoffwechsel und der Durchblutung der Haut besitzt der Körper zwei Mechanismen, um unbemerkt die Körpertemperatur in einer Umgebung von 37°C zu regeln. Erst wenn die Differenz zur Umgebungstemperatur zu groß wird, kommen zwei extreme Maßnahmen zum Tragen, die vom Menschen bewußt wahrgenommen werden: Schwitzen bei Überhitzung und Muskelzittern bei Unterkühlung. Die ca. 2 Millionen Schweißdrüsen eines Menschen sind in der Lage, weit mehr als einen Liter Flüssigkeit pro Stunde, verteilt auf durchschnittlich 1,8m² Hautoberfläche, abzusondern [31] [97]. Meyers Untersuchungen zufolge wird spürbare Schweißsekretion

in clo oder m^2K/W nimmt bei steigender Windgeschwindigkeit ab. Auch Stühle werden in der Wärmebilanz berücksichtigt. Stühle mit geschlossener Sitzfläche und Rückenlehne haben je nach Material Wärmedurchlaßwiderstände zwischen 0,1 und 0,3 clo.

Die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers an die Umgebung erfolgt per

- Wärmeleitung
- Wärmekonvektion
- Wärmestrahlung
- Verdunstung und Atmung
- Konduktion

Temperaturregelung unter stationären Verhältnissen

Die empfundene Umgebungstemperatur eines Menschen setzt sich zusammen aus der lokalen Lufttemperatur und dem Mittel der von lokalen Umschließungsflächen und aktiven Wärmequellen emittierten Wärmestrahlung[91]. Meyer[31] nennt diesen synthetisch berechneten Temperaturwert *Operative Temperatur* T_0 , da die *empfundene Temperatur* auch vom Bekleidungsgrad und der Luftfeuchte abhängt. In der Regel gehen Lufttemperatur und Wärmestrahlung zu gleichen Anteilen in die Berechnung der operativen Temperatur ein[30]. Glück, zitiert in [89], macht das Einflußverhältnis jedoch von der relativen Luftgeschwindigkeit abhängig:

Relative Luftgeschwindigkeit [m/s]	Anteil Einfluß Lufttemperatur [%]
< 0,2	50
0,2 bis 0,6	60
0,6 bis 1,0	70

Karyono[104] bezeichnet die Kombination aus operativer Temperatur und Luftbewegung als *äquivalente Temperatur*. Abbildung 3.10 zeigt den Zusammenhang zwischen Raumluft- und Oberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen [93]¹³.

Je nachdem, welche Körperzone einer extremen Temperatur ausgesetzt ist, reagiert das menschliche Hirn mit unterschiedlichen Regelungsgeschwindigkeiten. Das lokale Wärmeempfinden der Hand „mißt“ sehr schnell und wird vom Großhirn geregelt. Das gesamtkörperliche Wärmeempfinden regelt den Wärmehaushalt und „beschleicht und ergreift den Menschen allmählich.“ Füße und Kopf senden den stärksten Wärmestrom, sind also am stärksten belastet. Es folgen Hände und weibliche Oberarme. Der - zumeist bekleidete Rumpf - kühlt nicht so schnell aus [22].

Empfundene Temperatur

Eine intensive Untersuchung über kompensatorische Effekte bezüglich der Behaglichkeit bei bestimmten empfundenen Temperaturen stellt Runa Tabea Hellwig in ihrer Dissertation [99] an. Starke kompensatorische Effekte sind demnach der Freiheitsgrad, mit dem Nutzer von Gebäuden die klimatischen Verhältnisse selbst regeln können sowie der Anteil natürlicher Belüftung. Aber

¹³W. Frank: „Raumklima und thermische Behaglichkeit“, Berichte aus der Bauforschung, Heft 104, Berlin 1975

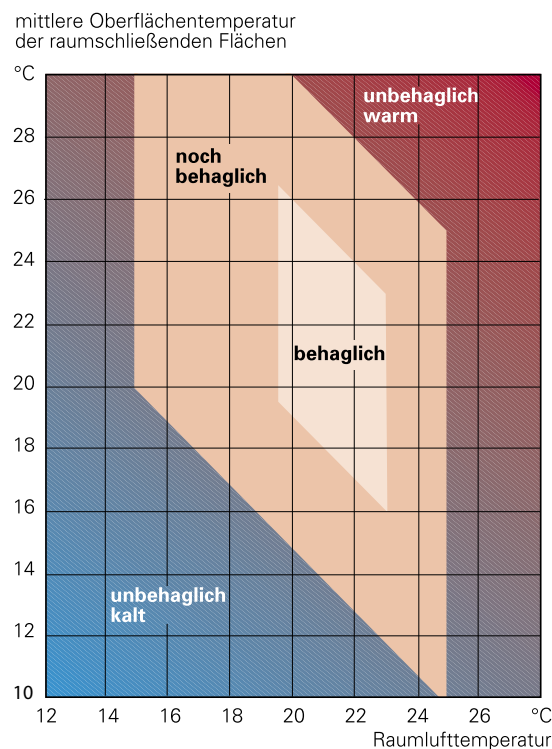


Abbildung 3.10: Thermische Behaglichkeit bei sitzender Beschäftigung, mittlerer Aktivität und entsprechend angepaßter Bekleidung [93]

auch Lichtverhältnisse, Klimaschwankungen und Störgeräusche wirken sich auf die subjektive Wahrnehmung der Raumtemperatur aus.

Physikalische Bedingungen	Physiologische Bedingungen	Intermediäre Bedingungen
Lufttemperatur	Konstitution	Kleidung
Temperatur umschließender Flächen	Körperliche Verfassung	Tätigkeitsgrad
Relative Feuchte	Geschlecht	Adaption und Akklimatisation
Luftbewegung	Alter	Tages- und Jahresrhythmus
Luftdruck	Ethnische Einflüsse	Raumbesetzung
Luftzusammensetzung	Nahrungsaufnahme	Psychosoziale Faktoren
Luftelektrizität	<div>Primäre und dominierende Faktoren</div> <div>Zusätzliche Faktoren</div> <div>Sekundäre und vermutete Faktoren</div>	
Akustische Einflüsse		
Optischer Einfluss		

Abbildung 3.11: Thermische Behaglichkeit

Abbildung 3.11 zeigt die wichtigsten Faktoren für das Vorhandensein thermischer Behaglichkeit auf. Die physikalischen Bedingungen, dies sind die primären und dominierenden Faktoren, werden durch das Gebäude, also indirekt durch dessen Planer, Erbauer und Betreiber beeinflusst. Die

physiologischen und intermediären Bedingungen hingehen hängen individuell von jedem einzelnen Nutzer des Gebäudes ab und sind somit schwer durch dessen Planung beeinflussbar.

Die empfundene Temperatur in einem Raum sollte optimalerweise konstant sein, da dann der menschliche Körper keine spürbaren Regulierungsmaßnahmen treffen muß, die den Menschen von seiner eigentlichen Tätigkeit ablenken. Doch nicht nur der Durchschnitt der umgebenden Wärmequellen spielt eine Rolle, sondern auch die räumliche Gleichmäßigkeit der Strahlung. Asymmetrische Strahlung kann eine Ursache für Diskomfort sein [91]. Als extremes Beispiel seien hier die einseitigen Wärmestrahlungen durch Kaminfeuer oder Lagerfeuer in einer ansonsten kalten Umgebung genannt, bei der eine Körperhälfte auskühlt während sich die andere überhitzt. Grundsätzlich gilt bei asymmetrischer Strahlung, daß die Abkühlung der Gesichtsfelder angenehmer ist als die des Rückens oder der Seite.

Die Intensität der Wärmestrahlung ist jedoch auch abhängig von der Entfernung des jeweiligen Menschen zu den raumumschließenden Flächen. Je größer dieser Abstand, desto geringer ist der Einfluß ihrer Oberflächentemperaturen auf die thermische Behaglichkeit [93]. Die Strahlungstemperatur verliert noch mehr an Bedeutung, wenn sich zwischen einer Person und der Strahlungsfläche noch weitere Menschen befinden, was in Bahnhofshallen in verkehrstarken Zeiten häufig der Fall ist.

Die DIN1946T2 [91]¹⁴ gibt maximal zulässige Werte für Strahlungstemperatur-Asymmetrien an, die allerdings nach [31] eine zu starke Vereinfachung für die Planung darstellen:

Bauteil	Maximal zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie
für warme Deckenflächen	$\pm 3,5K$
für kalte Wandflächen	$\pm 8,0K$
für gekühlte Deckenflächen	$\pm 17,0K$
für warme Wandflächen	$\pm 19,0K$

Insbesondere Fensterscheiben weisen je nach Witterung und Jahreszeit eine deutlich höhere oder niedrigere Strahlungstemperatur auf als Mauerwerk oder andere massive Wände [93].

Der Länderausschuß für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI) stellt in seiner Publikation über Kenngrößen zur Beurteilung raumklimatischer Grundparameter maximale Strahlungsasymmetrien in Abhängigkeit der örtlichen Lufttemperatur dar[91]. Je niedriger die Temperatur, desto resistenter reagiert der menschliche Körper auf unterschiedliche Strahlungsleistungen aus verschiedenen Richtungen.

Lufttemperatur	Maximale Strahlungsasymmetrie
$< 15\text{ }^{\circ}C$	300 W/m^2
$< 10\text{ }^{\circ}C$	400 W/m^2
$< 5\text{ }^{\circ}C$	500 W/m^2

¹⁴seit Mai 2005 ersetzt durch DIN EN 13779

Temperaturgefälle in Räumen

Temperaturgefälle sind einseitige, nicht wiederkehrende Veränderungen. Sie können räumlich, zumeist als vertikale Schichtung auftretend, oder zeitlicher Natur sein. Temperaturschwankungen empfindet ein Mensch entweder, wenn sich die Umgebungstemperatur an seinem Aufenthaltsort ändert, oder der Mensch seinen Aufenthaltsort ändert und einen neuen Ort mit unterschiedlichem lokalen Klima betritt.

Zeitlicher Temperaturverlauf Nach [91] spielt nicht nur die Höhe der Temperatur, sondern auch ihre erste Ableitung, das heißt die Veränderung der Temperatur in der Zeit eine wichtige Rolle für den thermischen Komfort. So stellt sich z.B. ein Kälteempfinden ein, wenn die Temperatur im Bereich der Haut schneller als $0,004K/s$ bzw. $14,4K/h$ absinkt. Im umgekehrten Fall reagiert die Haut sogar noch empfindlicher: Die entsprechenden Wärmesensoren reagieren auf Anstiege der Temperatur von $0,001\frac{K}{s}$ bzw. $3,6\frac{K}{s}$.

Im Gegensatz von Temperaturgefällen ist der Temperaturverlauf bei Temperaturschwankungen zyklisch, das heißt es werden immer wieder hohe Temperaturspitzen, Mittel- und Tiefstwerte erreicht. Je nach Aktivitätsgrad der Person werden maximal $0,5\frac{K}{min}$ als angenehm empfunden[22], nach [35] liegt die Grenze bei $2\frac{K}{h}$.

Das Innenraumklima ist aufgrund des Wärmeaustausches mit der Außenluft, der solaren Energiegewinne und durch die Kleidung und Gewöhnung der Menschen stark vom Außenklima abhängig. Das Außenklima hat sowohl einen jährlich als auch täglich wiederkehrenden Zyklus, der allerdings witterungsbedingt Schwankungen unterliegt.

Räumlicher Temperaturverlauf Vertikale Temperaturgradienten können je nach Stärke und Richtung negative Auswirkungen auf das Behaglichkeitsempfinden haben [31]. Nach [91] und der DIN 1946 Teil 2¹⁵ sollten die Temperaturschichtungen im Raum weniger als $2K/m$ betragen. So werden z.B. Temperaturdifferenzen zwischen Kopf oder Nacken und Fußbereich recht empfindlich als unbehaglich wahrgenommen. Meyer[31] findet in seiner Dissertation heraus, daß eine Gesamttemperaturdifferenz von $3K$ bezogen auf die durchschnittliche Körperhöhe eines Menschen bei 5% der Betroffenen zu einem Gefühl thermischer Unbehaglichkeit führt.

Der Raumlufttemperaturverlauf über die Höhe ist nach [26] besonders relevant bei

- großen Heizlasten
- hohem konvektivem Anteil der Wärmeabgabe der Heizflächen (Luftheizung, Konvektoren)
- Anordnung von Heizkörpern an den Innenwänden
- Flächenheizung in oberem Raumbereich (Deckenheizung)
- keinem bzw. geringem Luftwechsel

¹⁵ seit Mai 2005 ersetzt durch DIN EN 13779

Menschliche Produktivität in Gebäuden

Nach [30] sind Raumtemperaturen ein wesentliches Kriterium für die *Arbeitsproduktivität* der in einem Gebäude beschäftigten Arbeitskräfte, vor allem bei geistiger Arbeit ohne starke körperliche Aktivität. Folgende Raumtemperaturen empfiehlt die Arbeitsstättenrichtlinie 6/1.3 [91]:

Tätigkeit	Temperatur
Bürotätigkeit sitzend	20°C
in Verkaufsräumen	19°C
nicht sitzende Tätigkeit	17°C
schwere körperliche Arbeit	12°C
Höchsttemperatur	26°C

Die folgenden Intervalle geben an, welche Auswirkungen Wärmestrahlungen auf Menschen haben:

Wärmestrahlung	Auswirkung
$\leq 35 \frac{W}{m^2}$	ohne arbeitsbelastenden Einfluß
$> 35 \frac{W}{m^2}, \leq 300 \frac{W}{m^2}$	arbeitsbelastend, u.U. Entwärmungsphasen erforderlich
$> 300 \frac{W}{m^2}$	Entwärmungsphasen erforderlich, u.U. Verbrennungsgefahr

Nach der DIN EN ISO 7730 [91] [35] liegen die optimalen operativen Temperaturen für leichte bis mittlere Aktivitäten im Sitzen während der Heizperiode im Winter zwischen 20°C und 24°C, während der Kühlperiode im Sommer zwischen 23°C und 26°C.

3.3.2 Thermischer Komfort - Luftfeuchte

Neben der Temperatur spielt die Luftfeuchtigkeit in Räumen eine wichtige Rolle für das Empfinden von thermischer Behaglichkeit. Der Mensch besitzt zwar kein Organ, um Luftfeuchte zu messen, allerdings spürt er Luftfeuchtigkeit indirekt über die Möglichkeit, Wärme durch Schwitzen abzugeben und elektrostatischen Entladungen zwischen sich und seiner Umgebung. In Bezug auf die Luftfeuchtigkeit ist zwischen absoluter und relativer Luftfeuchte zu unterscheiden. Bei steigender Temperatur ist Luft stärker in der Lage, verdunstendes Wasser zu binden.

Bei erhöhter Luftfeuchte wird die Lufttemperatur auf der Haut intensiver wahrgenommen als die gleiche Temperatur bei geringerer Feuchte[91], ein Effekt, den Saunabesucher bei jedem Aufguß am eigenen Leib zu spüren bekommen.

Ist die relative Luftfeuchte zu hoch, kann die Luft nur noch wenig zusätzlichen Wasserdampf aufnehmen, sodaß die Menschen, die sich in ihr aufhalten, keine Wärme durch Schwitzen abführen können und Gefahr laufen, einen Hitzestau zu erleiden. Ist die absolute Luftfeuchte niedrig, sinkt die elektrische Leitfähigkeit der Luft, sodaß sich Körper stärker elektrostatisch auf- und wieder entladen können.

Die DIN EN ISO 7730 [35] [91] legt den Behaglichkeitsbereich für Lufttemperaturen zwischen 18°C bis 24°C bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 30% und 70% fest. Die absolute Luftfeuchtigkeit soll nach [23] und [91] $11,5 \frac{g_{Wasser}}{kg_{Luft}}$ nicht überschreiten. Nach [129] soll die absolute Luftfeuchtigkeit zwischen 5 und $12 \frac{g_{Wasser}}{kg_{Luft}}$ liegen.

Die Arbeitsstättenrichtlinie 5 [91] empfiehlt folgende maximalen relativen Luftfeuchtwerte:

Relative Luftfeuchte	Temperatur
80%	20°C
70%	22°C
62%	24°C
55%	26°C

Nach [34] beträgt die Wasserdampfabgabe eines sitzenden, körperlich nur leicht tätigen Menschen bei 30% bis 70% relative Luftfeuchte je nach Temperatur 35 bis 65g/h.

3.3.3 Thermischer Komfort - Luftgeschwindigkeit

Das dritte zentrale Kriterium für das Vorhandensein thermischer Behaglichkeit ist die Luftgeschwindigkeit. Auch dieses Kriterium ist abhängig von der Umgebungstemperatur: Bei großer Hitze sorgt Luftzug dafür, daß die Luft kühler wahrgenommen wird als sie tatsächlich ist. Dieser Effekt wird bis zu einem gewissen Grad positiv empfunden. Lufttemperaturen unterhalb der Hauttemperatur werden bei Erhöhung der Luftgeschwindigkeit ebenfalls kühler empfunden [91]. Das liegt unter anderem daran, daß sowohl die konvektive Wärmeabgabe bei Luftbewegung als auch die Abführung von Wasserdampf beim Schwitzen bei bewegter Luft schneller erfolgen. Luftzug wird grundsätzlich als Abkühlung empfunden, bei niedrigen Temperaturen also auch als Diskomfort, siehe Abbildung 3.12. Nach [35] sollte die Luftgeschwindigkeit im Gebäude im Winterhalbjahr unter 0,15m/s, im Sommer unter 0,25m/s liegen.

Luftzug wird bereits seit 1938 wie folgt definiert:

1. übermäßige Geschwindigkeit normal temperierter Luft
2. zu niedrige Temperatur von Luft mit normaler Geschwindigkeit
3. Abstrahlung an kalten Raumboberflächen
4. Kombination der drei erstgenannten Faktoren

Lueder[22] bezeichnet 1967 bereits Luftgeschwindigkeiten von $v_{Luft} > 0,1m/s$ als Luftzug.

Fanger[8] definiert Luftzug als eine ungewollte lokale konvektive Auskühlung einer Person.

Zugluft entsteht auf vielfältige Art und Weise. Zum einen durch geöffnete Türen und Fenster und gleichzeitigem Temperatur- oder Druckgefälle zwischen den Räumen. Ebenso können bei geöffneter Hülle stürmische Winde außerhalb des Gebäudes für Luftzug im Gebäude sorgen. Bei geschlossenen Türen und Fenstern können jedoch auch Zugerscheinungen durch Kaltluftabfall an der Fassade entstehen. Nach [30] liegen diese Luftbewegungen mit einer Geschwindigkeit von

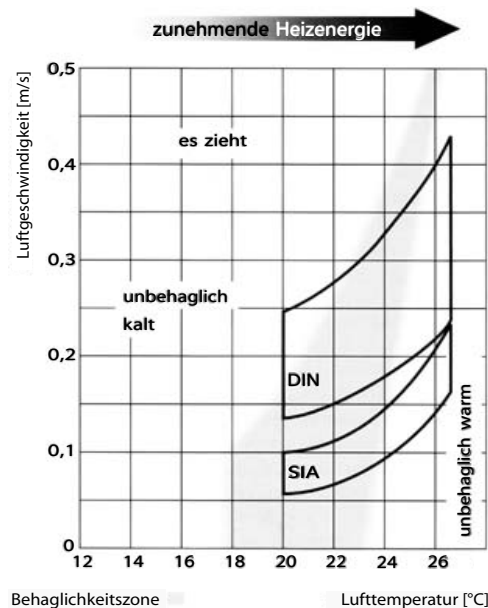


Abbildung 3.12: Komfort, abhängig von Luftgeschwindigkeit und -temperatur [79]

$v \leq 0,2 \text{ m/s}$ jedoch innerhalb des behaglichen Bereichs, wenn der U-Wert der Fassade höchstens $1,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ beträgt und die betroffenen Personen sich mindestens 1m von der Fassade entfernt aufhalten[94].

Des Weiteren hängt das Empfinden der Luftgeschwindigkeit auch von der Anströmrichtung und der Gleichmäßigkeit der Strömung bzw. dem Turbulenzgrad ab [91], die nicht nur von der Architektur und der Anlagentechnik, sondern vor allem auch von der Anwesenheit von Personen abhängen [93].

Turbulenzgrad im Gebäudebereich Luftgeschwindigkeitsschwankungen, die auf der Haut sehr sensibel als Temperaturschwankung bzw. zentral als Warnsignal wahrgenommen werden. Der Turbulenzgrad, und damit auch das Zugluftrisiko und der wahrscheinliche Prozentsatz Unzufriedener berechnet sich aus der Standardabweichung der verschiedenen gemessenen Luftgeschwindigkeiten und der Änderungsfrequenz. Minimale Luftbewegungen sind für den Wärmetransport erforderlich [91].

Abbildung 3.13 [91]¹⁶ zeigt äquivalente laminare Luftgeschwindigkeiten, die ähnliche Wirkungen auf das thermische Empfinden haben wie durchschnittlich turbulente Luftströme geringerer Geschwindigkeit.

3.3.4 Messung des thermischen Komforts

Da die thermische Behaglichkeit nicht nur von den oben genannten physikalischen Bedingungen, sondern auch von vielen anderen Faktoren wie Bekleidung und Aktivitätsgrad abhängt, lässt sich

¹⁶Quelle: Technical Review 1/1985, Fa. Brüel & Kjaer, DK-2850 Naerum

Aktuelle turbulente Luftgeschwindigkeit (3 min. Mittelwert) [m/s]	Äquivalente laminare Luftgeschwindigkeit [m/s]
0,10	0,24
0,15	0,30
0,22	0,36
0,29	0,45
0,40	0,60

Abbildung 3.13: Vergleich von turbulenter und laminarer Luftgeschwindigkeit

Komfort nicht allgemeingültig mit einem Meßgerät messen. Allerdings können die komfortrelevanten physikalischen Zustandsgrößen gemessen werden und zu den stochastischen Optimalbedingungen ins Verhältnis gesetzt werden.

Dafür gibt es folgende Meßkonzepte und dazugehörige Meßgeräte:

Einzelkomponentenmessung Mit einem oder mehreren Meßgeräten werden Luft- und Strahlungstemperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte gemessen und dann zusammen statistisch ausgewertet. Diese Methode wird in Kapitel 4 dieser Arbeit verwendet.

Klimasummenmessung Das Meßgerät „simuliert“ einen menschlichen Körper. Dazu besitzt es eine für Menschen typische Temperatur und Feuchte und wird dem Raumklima ausgesetzt. Das Gerät liefert nur einen Wert, den Wärmeverlust oder -gewinn. Es ist daher richtungsblind und erkennt weder Quellen von Luftströmungen noch Strahlungsasymmetrien.

Hauttemperaturmessung an menschlichen Probanden

Bei der Bewertung von Komfort durch Personen, die einer bestimmten Situation ausgesetzt sind, spielt es eine wichtige Rolle, ob ihnen die einzelnen Komfortparameter aufgezwungen wurden, oder ob sie sie selbst eingestellt haben. Beispielsweise wird Luftzug durch ein geöffnetes Fenster weniger störend empfunden, wenn man das Fenster aus eigenem Willen selbst geöffnet hat, als Luftzug aus Gründen, die man nicht beeinflussen kann.

3.3.5 Bedarfsgerechter thermischer Komfort - Bewertung durch Nutzer

Da aufgrund der unterschiedlichen Reaktionen verschiedener Menschen auf dieselbe thermische Umgebung auch das Komfortempfinden unterschiedlich ausfällt, ist die gesamthafte Bewertung der thermischen Behaglichkeit keine eindeutige, sondern eine statistische Größe. Beurteilung der Komfortklassen erfolgt daher anhand des maximalen Anteils Unzufriedener [30]:

Kategorie	Bewertung	Maximaler Anteil Unzufriedene
A	sehr gut	6%
B	gut	10%
C	akzeptabel	15%

Bedarfsgerechter Komfort bedeutet aber auch, daß ein energetisch teuer erkaufte Komfortniveau auch wirklich nur dann erzeugt wird, wenn sich auch tatsächlich Personen in den entsprechenden Räumen befinden oder in Kürze befinden werden. Komfortzustände innerhalb eines Gebäudes

sind also Funktionen von genau definierten Ortsangaben und Zeit. Darüberhinaus können sich trotz konstanter Raumnutzung durch den- oder dieselben Menschen Änderungen in dessen Aktivitätsgrad oder Bekleidung ergeben, beispielsweise einige Minuten nach dem Betreten eines Raumes, sodaß auch hier eine Änderung des Komfortbedarfs stattfindet. Abbildung 3.14 zeigt das Feedbackmodell der thermischen Behaglichkeit [109] nach [118].

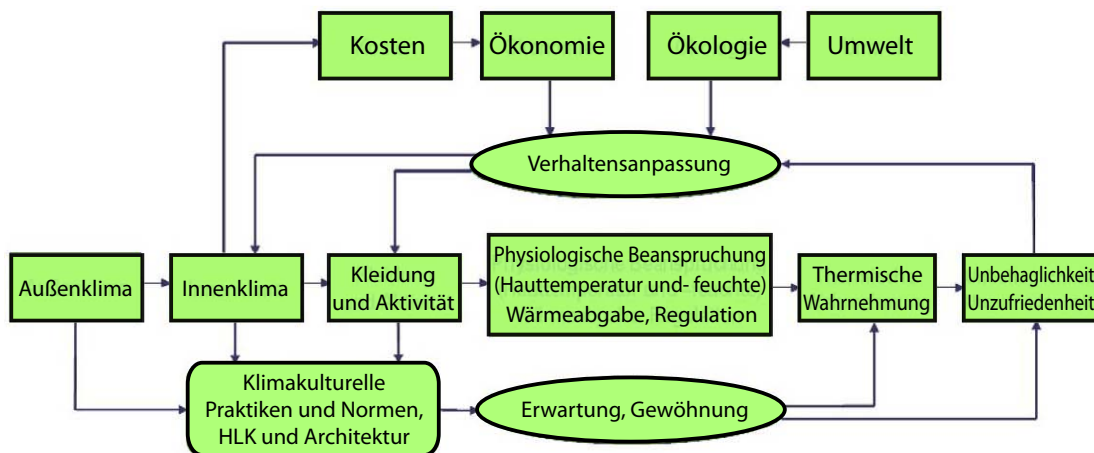


Abbildung 3.14: Feedbackmodell der thermischen Behaglichkeit[109]

Jahreszeiten

Die optimale Raumtemperatur im Winter beträgt $22,5^{\circ}\text{C}$, im Sommer 25°C bis 26°C , allerdings nur, wenn kurzärmelige Hemden erlaubt sind. Sind jedoch ganzjährig Anzüge mit Krawatte vorgeschrieben, so liegt die erträgliche Temperatur $2,5\text{K}$ tiefer. In Atrien oder Sporthallen, in denen die Menschen einen hohen Aktivitätsgrad haben, liegen die optimalen Temperaturen zwischen 15°C und 18°C [30]. Um das Innenraumklima innerhalb eines thermisch behaglichen Temperaturbereichs regeln zu können, sind in unseren Breiten aktive und / oder passive Heizungs- und Kühlungsmaßnahmen nötig.

Regelung der Parameter des thermischen Komforts

Wie aus den vorangegangenen Abschnitten ersichtlich, ist Komfort keine Konstante, sondern verändert sich dynamisch mit den Nutzern eines Gebäudes und den Randbedingungen wie Wetter, Uhr- und Jahreszeit.

Damit ein Gebäude dynamische Aufenthaltsbedingungen schaffen kann, bedarf es einer Regelungstechnik, die zustands- und zeitabhängig die technischen Anlagen eines Gebäudes steuert. Die bestehenden Zustände werden mithilfe von Sensoren und Meßgeräten gemessen.

3.3.6 Thermisch relevante Gebäudeteile

Fassade

Die Fassade nimmt in der Literatur [30] den eindeutig größten Raum ein, da aufgrund der Wärmetransmission durch Wände, Fenster, Fensterrahmen und Türen sowie Wärmestrahlung durch Fenster sehr stark das Innenraumklima beeinflusst wird.

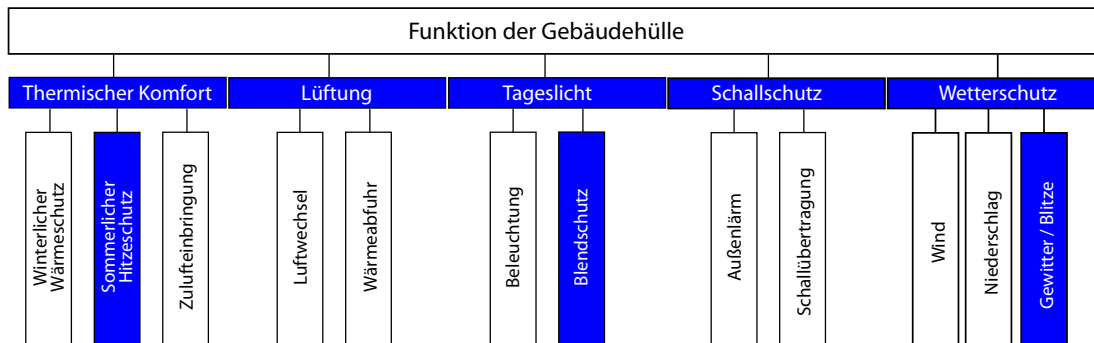


Abbildung 3.15: Funktionen der Fassade bei Gebäuden nach [79]

Abbildung 3.15 zeigt die Aufgaben *der* Gebäudehülle bei „klassischen“ Gebäudetypen wie Wohnhäusern, Büros, Schulen oder Geschäften. In Bahnhöfen gibt es nicht *die* Gebäudehülle, sondern eine Staffelung verschiedener Hülleebenen mit jeweils hoher Durchlässigkeit, die differenzierte klimatische Zonen innerhalb des Gesamtkomplexes bilden. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, intelligente Fassaden- und Zonierungsschemata zu finden, die ein Minimum an energetischen Gefällen und ein Maximum an Funktionalität, wie z.B. Beweglichkeit der Reisendenströme zulassen.

Dach

Das Dach unterscheidet sich von senkrechten Fassaden in seinem Neigungswinkel gegenüber Sonne und Niederschlägen, der daraus resultierenden Wasserdichtigkeit sowie in seinem Aufbau. Bezüglich des thermischen Komforts spielt es eine wichtige Rolle, da auch Transmission und Wärmestrahlung das Innenraumklima beeinflussen. Befinden sich unter dem Dach abgehängte oder Zwischendecken, so ist der Einfluß eher gering. Außerdem sei auf das differenzierte Komfortempfinden der verschiedenen Körperteile hingewiesen, wonach der Kopf kühlere Temperaturen bevorzugt als der restliche Körper[33].

Fußboden und Bänke

Neben Strahlung und Konvektion spielt die Konduktion für den menschlichen Körper nur eine untergeordnete Rolle, da Menschen zumeist nur über ihre Füße direkten Kontakt zum Gebäude haben. Die Fußbodentemperatur spielt vor allem in Wohngebäuden oder Turnhallen eine Rolle,

wenn Menschen lange Zeit ohne Schuhwerk Kontakt zum Fußboden haben. Bei kürzerer Kontaktdauer, wie auf Verkehrsflächen in Gebäuden, ist der akzeptable Temperaturbereich sehr viel größer (ca. 12°C bis 32°C) als in Aufenthaltsbereichen mit längerem Bodenkontakt (ca. 21°C bis 29°C). Der Temperaturunterschied zwischen Kopf- und Fußbereich sollte 2K nicht überschreiten [30], wobei der Kopf immer eine kühlere Umgebung haben sollte als die Füße. Konduktion spielt in Bahnhöfen dann eine Rolle, wenn Personen auf ungepolsterten Bänken sitzen und warten. Eine eingeschränkte Wärmeleitfähigkeit der Bänke oder eine gemäßigt temperierte Umgebung können helfen, extreme Temperaturen bei Sitzbänken zu vermeiden. Außerdem führt das Anlehnen an Wände zu Wärmeaustausch per Konduktion [97].

Speicherfähigkeit

Die Bauschwere hat nach [89] einen untergeordneten Einfluß auf die thermische Behaglichkeit¹⁷, da offensichtlich nur die rasch reagierenden oberflächennahen Schichten der Umfassungsflächen an den Wärmeübertragungsvorgängen beteiligt sind. Lediglich im Zusammenhang mit einem großen Fensterflächenanteil spielt die puffernde Wirkung von Bauteilmasse eine positive Rolle, da sie dämpfend auf Temperaturschwankungen wirkt.

3.3.7 Beispielhafte Gebäudetypen

Die oben genannten Kriterien des thermischen Komforts beziehen sich auf geschlossene Räume, wie z.B. Büroräume und Wohnhäuser. Diese Gebäudetypen sind jedoch nur teilweise mit Bahnhofsbauten vergleichbar. Aufgrund der offenen Struktur und der großen lichten Höhen in Empfangs- und Bahnsteighallen werden an dieser Stelle Komfortuntersuchungen zu Hallen, Atrien und Außenbereichen zusammengefaßt.

Hallen

In einer Untersuchung des Gas-Wärme Instituts e.V. aus Essen über die Klimatisierung von Hallen [25] wird deutlich, daß sich Hallen nicht wie einzelne Räume in Wohn- oder Bürohäusern über die Temperierung der Zuluft klimatisieren lassen. Das Verhältnis von Luftvolumen und Luftwechsel zu Anzahl Personen ist in Hallen aufgrund der Raumhöhe besonders groß. Es ist also nicht effizient, die Luft zu erwärmen und den Menschen per Konvektion Wärme zuzuführen. Vielmehr wird in Hallen Strahlungsheizung eingesetzt, um die fehlende Lufttemperatur zu kompensieren.

Der Einsatz von Strahlungsheizung kann sich aber auch nachteilig auf die Behaglichkeit des Menschen auswirken. Entsprechend den Temperaturen der Hallenflächen wirken unterschiedliche Wärmestromdichten auf den Menschen, die Temperaturasymmetrien bewirken. Diese unterschiedlichen Temperaturen können die Behaglichkeit des Menschen beeinträchtigen. Strahlungsheizsysteme sind deshalb so auszulegen und anzuordnen, daß eine gleichmäßige Intensitätsverteilung erreicht wird und starke Temperaturasymmetrien vermieden werden. Durch die starken Temperaturgefälle bei Strahlungsheizungen können zudem Zuglufterscheinungen nicht vermieden werden.

¹⁷ sie spielt allerdings eine große Rolle bei der Betrachtung der Energieeffizienz

Die Alternative zu Strahlungsheizungen sind Konvektionsheizungen, die entsprechend dem Wärmebedarf der Halle nur Teilbereiche beheizen. Dadurch können lange Aufheizzeiten vermieden und schnell stationäre Bedingungen erreicht werden. Von Nachteil sind allerdings halleninterne „Energieverluste“, wie zum Beispiel beim ServicePoint in einer Bahnhofshalle.

Die in [25] beschriebenen Untersuchungen beziehen sich ausnahmslos auf die Heizperiode. Offensichtlich spielt das Sommerhalbjahr beim thermischen Komfort in Hallen keine kritische Rolle, da sich durch die natürliche Konvektion aufgrund von thermischem Auftrieb heiße Luft in Luftschichten weit über den Köpfen der Menschen konzentriert und die kühlsste Luft sich in Bodennähe befindet. Dies gilt natürlich nur, wenn nicht durch große Fenster starke einfallende Sonneneinstrahlung auf dem Hallenboden in Wärme umgewandelt wird.

Atrien

Atrien sind in ihrem thermischen Verhalten vergleichbar mit verglasten Bahnhofshallen. Sie sind praktisch reine Verkehrsflächen. Die direkte Sonnenbestrahlung in einem Atrium wird als Strahlungstemperatur von etwa 45°C empfunden. Die empfundene Temperatur kann jedoch durch die Raumhöhe (-10K im unteren Bereich) und Verschattungen (-5K) reduziert werden. Durch den Sichtkontakt nach außen orientiert sich das Wärmeempfinden auch an dem Vergleichsklima draußen. Das Komfortempfinden kann also noch positiv sein, selbst wenn es für ein Innenraumklima eigentlich zu heiß ist[30].

Außenbereich

Die Erkenntnisse über den thermischen Komfort in Hallen und Atrien läßt sich gut auf Empfangshallen und eingehauste Bahnsteige übertragen. Die Arbeit von Fazia Ali Toudert[27] dagegen ist hilfreich für die Komfortoptimierung im Außenbereich zwischen den Baukörpern, vergleichbar mit offenen Bahnsteigen und anderen Flächen vor, neben oder hinter dem Empfangsgebäude.

Die vorgenommenen Untersuchungen betreffen ausschließlich die Sommerperiode, das heißt Komfort versus Blendung und Überhitzung. Die untersuchten Parameter sind zum einen die Ausrichtungen von Straßen¹⁸ und das Verhältnis von Höhe der Bebauung zu Breite der Straße.

Den stärksten Einfluß auf den Menschen hat die Strahlungstemperatur der bestrahlten Umgebungsbebauung, die direkte Bestrahlung der Sonne ist sekundär. Daher ist vor allem eine Abschattung der Umgebungsflächen nötig. Die Luftgeschwindigkeit und -temperatur sind ebenfalls von sekundärer Bedeutung. Allerdings ist die Verfügbarkeit von Strahlung in Innenräumen im Winter ein wichtiges zusätzliches Kriterium, welches auch bei der Optimierung der thermischen Behaglichkeit im Sommer berücksichtigt werden muß.

Nach [27] sind Bäume nur in breiten Straßen ($\frac{H}{B} < 0,5$) effektiv, bei $\frac{H}{B} > 1,0$ nur in West-Ost-Straßenzügen. Im Winter sind weite Straßenschluchten klimatisch und energetisch besser geeignet.

¹⁸also Nord-Süd, Ost-West und Zwischenrichtungen

3.3.8 Luftqualität

Die Luftqualität wird beeinflusst vom Geruch und der Menge an Schadstoffen, die in der Luft enthalten sind. Durch den Stoffwechsel von Menschen, technischen Prozessen aber auch durch einfaches Ausdünsten von Baustoffen und Einbauten verschlechtert sich im Laufe der Zeit die Luftqualität in Gebäuden. Abhilfe schafft Lüften und das Aufstellen von Pflanzen. Bei der Stoßlüftung sollte man sich nicht darauf verlassen, daß Raumnutzer rechtzeitig von selbst für eine ausreichende Lüftung sorgen. Der Effekt der Gewöhnung an die Geruchsbelastung eines Raumes ist so stark, daß zumeist nur technische Sensoren oder Menschen, die einen Raum neu betreten, in der Lage sind, Luftverunreinigungen zu registrieren[109].

Die Luftqualität in Bahnhöfen wird in den beiden Kernzonen aus folgenden Quellen beeinträchtigt:

Empfangshalle	Bahnsteighalle
Staub	Abgase Dieselmotoren
Raucher	Raucher
Geruchsbelästigung	
Schimmelpilze	Pollen

3.3.9 Lüftung

Für die Lüftung kommen grundsätzlich zwei verschiedene Verfahren in Betracht:

Natürliche Lüftung durch Fenster und Türen.

Mechanische Lüftung durch Luftkanäle, Rohre, Wärmetauscher und Lufteinlaßdüsen. Ventilatoren pumpen oder saugen Luft.

Bahnsteighallen sind durch die großen Öffnungen grundsätzlich ausreichend natürlich belüftet. Empfangshallen sind bei großer Fluktuation ebenfalls stark natürlich belüftet. Lediglich bei unterirdischen Bahnhöfen oder abgeschlossenen Räumen innerhalb von Bahnhöfen könnte eine mechanische Lüftung nötig sein.

Runa Tabea Hellwig [99] zeigt in ihrer Arbeit, daß trotz des häufig günstigeren thermischen Verhaltens von mechanisch belüfteten Gebäuden die Behaglichkeitsbewertung in frei belüftbaren Gebäuden höher und die Wahrscheinlichkeit des Sick- Building- Syndroms um 15% niedriger ausfällt. Obwohl die Klimatisierung eines Gebäudes gerade dazu da ist, ein konstant behagliches Klima im Gebäude vorzuhalten, bewerteten die 4500 Probanden in der Studie die klimatisierten Räume gegenüber den frei belüfteten Räumen als thermisch unbehaglicher, stärker temperaturschwankend, zugig und trocken. Lediglich bei der Bewertung der Lautstärke schnitten beide Belüftungsvarianten gleich gut ab. 85% der Probanden wünschten sich, Einfluß auf das Raumklima nehmen zu können. Hellwig führt daher einen neuen Modellparameter ein: *Den normierten (empfundene) Freiheitsgrad*, der als Funktionswert einer logistischen Funktion Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann.

3.3.10 Aerodynamik von Bauwerken

Die Aerodynamik von Bauwerken spielt in Bezug auf Komfort eine andere Rolle als die Aerodynamik von Automobilen, Flugzeugen oder Zügen. Während man in den letztgenannten Verkehrsmitteln die aerodynamischen Eigenschaften nur indirekt über Vibrationen, Schwingungen, Geräusche, Gleichmäßigkeit des Fahrverhaltens, Sicherheit der Bodenhaftung, Beschleunigungsverhalten und Energieverbrauch erfährt, sind Besucher von Gebäuden mit ihren eigenen Körpern teils turbulenten Strömungen ausgesetzt, die von der Aerodynamik des Bauwerks abhängen. Neben den Komfort beeinflusst die Aerodynamik von Gebäuden auch deren Standsicherheit.

Über die Aerodynamik von Bauwerken läßt sich generell folgendes sagen[12]:

- Bauten sind in der Mehrzahl stumpfe Körper
- Ihre Umströmung ist durch Ablösung gekennzeichnet
- Bodeneinfluß und Bodengrenzschicht sind ausgeprägt
- zwischen mehreren Bauwerken bzw. Bauteilen herrscht Interferenz

Aerodynamik im Außenbereich

Eine Besonderheit von Bahnhöfen gegenüber anderen Gebäudetypen besteht darin, daß es keine absolute Grenze zwischen innen und außen gibt¹⁹. Während sich einige Funktionen wie Taxistand und Bahnsteigausläufer im Außenbereich befinden, und Büros und Tagungsräume zu klassischen Innenräumen zählen, gibt es zahlreiche Zwischenstufen wie Zuwege, Bahnsteige, Querbahnsteige, Empfangshallen und Wartebereiche. Vor allem Bahnsteige befinden sich in dem Spannungsfeld, als Aufenthaltsfläche thermisch behagliche Rahmenbedingungen liefern zu müssen, und gleichzeitig fast ausschließlich vom Außenklima abzuhängen.

Neben dem Schutz gegen Niederschlag spielt in den Außenbereichen eines Bahnhofs also die Aerodynamik eine wichtige Rolle. Strömungen im Außenbereich werden durch regionale Temperaturschwankungen und Luftdruckgefälle in der Erdatmosphäre hervorgerufen. In den tieferen Schichten über der Erdoberfläche werden diese Winde als Wetterphänomene spürbar. Während sich oberhalb der Dächer der Gebäude in einer Stadt Luft weitgehend laminar und mit relativ hohen Geschwindigkeiten bewegt, entstehen bei der Umströmung von stumpfen Bauwerken Ablösungen, die Nachlauf turbulent sind[29]. Dadurch entstehen unangenehme Zugerscheinungen.

Die Messungen in [27] geben Aufschluß über die Strömungsverhalten in Straßenschluchten. Windgeschwindigkeiten von $5m/s$ in einer Höhe von 10m entsprechen in Bodennähe

- $0,3m/s$, wenn Straßenschlucht senkrecht zur Windrichtung
- $2,4m/s$ bis $3,4m/s$, wenn Straßenschlucht parallel zur Windrichtung

3.3.11 Visueller Komfort

80% der Informationen erhält der Mensch über das visuelle System [100], und zwar nicht nur durch aktives Sehen oder Lesen, sondern durch das unbewußte Verarbeiten visueller Sinnesindrücke. Durch die visuelle Mustererkennung ist der Mensch jedoch in der Lage, aus der Vielzahl

¹⁹ siehe dazu auch Abschnitt 2.1

gleichzeitiger Informationen die für ihn wichtigen herauszufiltern. Das ist im Bereich der Akustik wesentlich schwieriger.

Das menschliche Auge kann Informationen und Objekte besonders dann gut wahrnehmen, wenn folgende Faktoren ein gewisses Minimum nicht unter- und ein gewisses Maximum nicht überschreiten:

- Kontrast
- Größe
- Leuchtdichte

Diese Eigenschaften bilden zusammen den *photometrischen Kontrast*. Bei zu hohem photometrischem Kontrast tritt der Effekt der Blendung ein.

Die optimale Beleuchtungsstärke in einem Gebäude liegt bei 300 lux [28]. Direkte Sonneneinstrahlung wird von den meisten Nutzern von Gebäuden subjektiv positiv wahrgenommen [94]. Mindestnennbeleuchtungsstärken in Bahnhöfen werden durch die Konzernrichtlinie 954 9103 der Deutschen Bahn AG geregelt, siehe Abbildung 3.16.

	Art des Innenraums bzw. Tätigkeit	Nennbeleuchtungsstärke E_n [lx]	Lichtfarbe	Stufe der Farbwiedergabeeigenschaften	Güteklasse der Begrenzung d. Direktblendung
Personenverkehrsanlagen	Empfangs-/Eingangshallen	200	nw	3	2
	Verbindungswege im Hallenbereich	100	nw	3	2
	Gepäckaufbewahrung, Aufstellzone von Schließfächern	200	nw	3	2
	Gepäck-/Expressgutschalter	300	nw	2A	1
	Wartesäle	200	nw	2A	2
	Reisezentren – Allgemeinbeleuchtung – Fahrkarten-, Reservierungs-, Auskunftsschalter	200 300	nw ww/nw	2A 1B	1 1

Abbildung 3.16: Mindestnennbeleuchtungsstärken in Bahnhöfen

Natürliches Licht wird gegenüber Kunstlicht von den meisten Menschen als behaglicher angesehen. Eine in [100] zitierte Studie belegt, daß Einzelhandelsmärkte in den USA mit Tageslichtbeleuchtung über 40% mehr Umsatz machen als Märkte, die nur mit Kunstlicht beleuchtet werden. Arbeitsplätze in Fensternähe besitzen ebenfalls eine höhere Komforteinschätzung als Arbeitsplätze in der Mitte von Großraumbüros oder gänzlich fensterlosen Räumen. Bei einer Befragung in realen Büroräumen gaben 69% der Probanden Tageslicht den Vorzug, 19% enthielten sich und 12% befürworteten Kunstlicht.

Die Tages- und Jahreszeit spielt ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Lichtverhältnisse [100]. Tendenziell wünschen sich Nutzer eine Innenraumhelligkeit, die mit der Helligkeit außen korrespondiert. Eine konstante künstliche Beleuchtung wird gegenüber der von der Tageszeit abhängigen natürlichen Beleuchtung als monoton und unbehaglich empfunden.

Komfort hinter Glas

Da sich Menschen nur noch durchschnittlich 10% ihrer Zeit im Freien und in frischer Luft aufhalten, aber dennoch das Bedürfnis nach einem visuellen Kontakt zur Umwelt haben, spielt thermischer Komfort hinter Glas eine immer wichtigere Rolle, vor allem durch die Gefahr der Übererwärmung des menschlichen Körpers und des damit verbundenen Hitzestaus.

In einem idealen Ambiente herrschen kühle Luft und hohe Strahlungstemperaturen, ähnlich der klimatischen Situation in einem Wald im Sommer. Vollverglasungen sind oftmals Wärmefallen, da das Licht nicht beim Durchdringen der Gläser, sondern erst im Raum in Wärme umgewandelt wird, und die Wärme nicht wieder entweichen kann. Folgende Maßnahmen sind möglich:

Maßnahme	Physikalischer Effekt
Sonnenschutz	Protektion
Lüftung	Konvektion
Wärmeleitung	Transmission
Wärmedämmung	Isolation
Bepflanzung im Inneren	
Speichermasse	

Da bei natürlichem Licht der Anteil des Lichts gegenüber dem Wärmeanteil mit annähernd 50% wesentlich höher ist als der Anteil von etwa 20% bei künstlichem Licht, ist die Nutzung des Sonnenlichts unter Behaglichkeits- und Energieeffizienz- sowie ökonomischen Gesichtspunkten dem Kunstlicht auch bei sehr starker Sonneneinstrahlung vorzuziehen.

Interessant ist der Zusammenhang zwischen Leuchtstärke der Sonneneinstrahlung und Lufttemperaturen. Laforgue und andere [114] haben herausgefunden, daß der zeitliche Abstand zwischen Lufttemperatur und Globalstrahlung etwa 4 Stunden beträgt, die Globalstrahlung also nur zur kurzfristigen Prognose der Lufttemperatur herangezogen werden kann. Nach dieser Studie tritt visueller Diskomfort häufiger auf als thermischer.

3.3.12 Akustischer Komfort

Anders als die Augen kann man Ohren gegen unangenehme Reize nicht verschließen. Der Mensch ist vorhandenen akustischen Reizen daher wesentlich schutzloser ausgesetzt als beispielsweise visuellen oder thermischen Störungen.

Nach [30] gibt es folgende Kenngrößen, die die akustische Qualität eines Raumes beschreiben:

- Nachhallzeit
- Gleichmäßigkeit der Schallverteilung
- Sprachübertragungsindex
- Konsonantenverlust

Akustische Störungen können sowohl permanente Geräusche wie Verkehrslärm sein, als auch kurzzeitig auftretende Töne mit Informationsgehalt, z.B. Sprachfetzen, Durchsagen, Streitgespräche und laute Telefonate. Ein hoher akustischer Komfort ist dann gegeben, wenn Schalleinflüsse auf

den eigenen Nutzbereich minimiert und die Sprachverständlichkeit innerhalb des Nutzbereichs erhöht wird.

In Bahnhöfen spielt vor allem die Verständlichkeit von lokalen Lautsprecherdurchsagen eine wichtige Rolle, die trotz starken Umgebungslärms durch Zuggeräusche, menschlicher Laute und Lautsprecherdurchsagen an benachbarten Orten im Bahnhof verständlich hörbar sein sollten.

3.3.13 Auswertung

Der Komfort in Gebäuden hängt ähnlich wie der Komfort bei Reiseketten von physikalischen Größen und individuellen physiologischen und psychologischen Parametern ab. Besonders wichtig scheint der thermische Komfort zu sein, der von der operativen Temperatur und der Lüftung abhängt sowie die Beleuchtung. Eine zusammenfassende Darstellung der Einflußgrößen ist in Abbildung 3.17 gegeben.

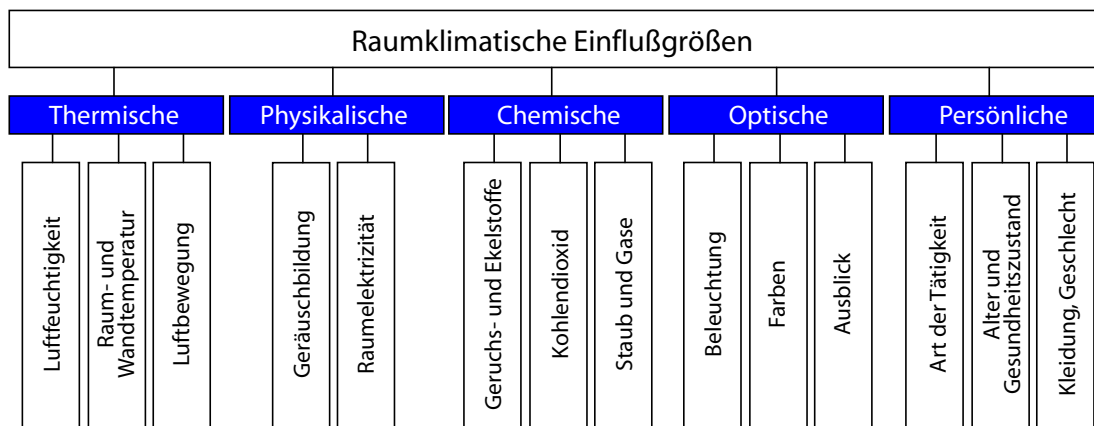


Abbildung 3.17: Einflußgrößen auf den Komfort in Räumen nach [79]

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, daß eine zu starke Technisierung der Gebäude von den Nutzern abgelehnt wird. *Wenig Technik ist mehr*, daher sind intelligente, systemische architektonische Lösungen gefragt, die ohne zu hohen energetischen Aufwand Behaglichkeit für möglichst viele Gebäudenutzer garantieren.

Ein sehr wichtiges Kriterium ist auch bei Gebäuden der Wunsch der Nutzer, auf die einzelnen komfortrelevanten Stellgrößen Einfluß nehmen zu können.

Die bestehenden Komfortmodelle beziehen sich auf geschlossene Gebäude mit weitgehend stationärem Innenraumklima, also klassische Arbeitsstätten wie Büroräume, Verkaufsräume, Schulen, Fabrikationshallen und Werkstätten.

Visueller und akustischer Komfort sind zwei Kriterien, die in Bahnhöfen eine wichtige Rolle spielen und einen großen Einfluß auf den Energieverbrauch und die Gesamtfunktionalität haben. Aus diesem Grund wurden bei den in Kapitel 4 beschriebenen thermischen Messungen auch visuelle und akustische Meßdaten erhoben. Da der Fokus dieser Arbeit jedoch auf der Optimierung von Energieeffizienz und thermischen Komfort liegt, werden die visuellen und akustischen Aspekte

aus Gründen der Vereinfachung in den numerischen Modellen und Simulationen in den weiteren Kapiteln nicht weiter berücksichtigt.

Anwendbarkeit auf Personenbahnhöfe

Die zitierten Komfortmodelle sind nur qualitativ auf Bahnhöfe anwendbar, sie können also gewisse Tendenzen aufzeigen, jedoch keine belastbaren numerischen Werte generieren. Folgende Parameter müßten in ein Komfortmodell für Bahnhöfe (Empfangsgebäude, Bahnsteighallen sowie Verkehrsflächen) implementiert werden:

- Diskomfort durch Niederschlag
- direkte Sonneneinstrahlung
- Dauer des Aufenthaltes
 - Frequenz der Zugfolge pro Verbindung
 - Durchschnittliches Verspätungsrisiko
- Luftgeschwindigkeiten $> 1\text{ m/s}$
- Sitzen (Konduktion)
- Lichtverhältnisse bezüglich
 - Sicherheit
 - Information
 - Sichtbeziehung zu Zügen
 - Anzeigetafeln
- Akustische Informationen
- Beweglichkeit
 - Geschwindigkeit zu Fuß
 - Dauer zum Erreichen des Zuges
 - Mitnahme von Gepäck
- Uhrzeit
 - Helligkeit, natürliche Beleuchtung
 - Anzahl und Art der Personen
- natürliche Belüftung im Innenbereich
- überdachter Außenbereich
- Durchschreiten von Klimazonen

3.4 Energieeffizienz von Gebäuden

Gebäude haben in Deutschland einen Anteil am Primärenergiebedarf von über 40% [1][30][109].

Während es für Wohn- und Bürogebäude schon eine ganze Reihe wissenschaftlicher Publikationen über Erfahrungen in Forschungsprojekten und effektive Erfolge in der Realität gibt, liegen für Personenbahnhöfe bisher keine vergleichbaren Studien vor. Weder bei der Deutschen Bahn AG, noch im europäischen Ausland, in den USA oder Japan gibt es bislang umfassende und systematische Untersuchungen zu dem Thema.

Die Senkung des Primärenergiebedarfs eines Gebäudes lässt sich auf zwei unterschiedliche Art und Weisen bewerkstelligen [109]:

1. Durch Senkung des Primärenergiebedarfs
 - Durch energieeffiziente Anlagen mit hohem Wirkungsgrad
 - Durch architektonische Lösungen, die einen geringen Einsatz technischer Anlagen erfordern
2. Durch Erzeugung von Energie mit einem niedrigen Primärenergiekoeffizienten ²⁰

Kruska [65] nennt diese drei Stellgrößen die „Drei Säulen einer zukunftsfähigen Energiewirtschaft“:

1. **Suffizienz**, Senkung der Energienachfrage durch geringeren Konsum

²⁰bzw. niedrigem CO_2 -Ausstoß

2. **Effizienz**, Reduzierung des Ressourceneinsatzes für die geforderten Dienstleistungen
3. **Substitution** der bisher eingesetzten Ressourcen durch eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen in der weltweiten Energieversorgung

Energieeffizienz von Gebäuden bedeutet also, daß für die Nutzer ein erforderliches Maß an Komfort und Funktionalität angeboten wird bei gleichzeitig minimalem Einsatz an Primärenergie. Was die Erzeugung von Energie mit niedrigen Primärenergiekoeffizienten, das heißt hohem regenerativem Anteil anbelangt, gibt es einige Studien speziell für den Bahnbetrieb [41] [37]. Was die Senkung des Energieverbrauchs in Gebäuden angeht, beschränken sich die vorhandenen Untersuchungen weitgehend auf den Wohnbau und Bürogebäude, darunter einige Untersuchungen zu Verwaltungsbauten der Deutschen Bahn AG [1] [46] [105].

Wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben, wird in Gebäuden physikalisch betrachtet keine Energie verbraucht, sondern Exergie in Anergie umgewandelt und dabei Entropie erzeugt. Exergie steht nur dann zur Verfügung, wenn ein Gefälle zwischen zwei unterschiedlichen energetischen Potentialen besteht. Die Optimierung von Komfort und Energieeffizienz in Gebäuden ist somit eine Betrachtung der energetischen Potentiale zwischen dem Inneren eines Gebäudes und seiner lokalen Umgebung. Die Potentiale rühren daher, daß im Gebäude ein behagliches Klima herrschen soll, während in der wesentlich größeren Umgebung ein unbehagliches Klima herrscht. Aufgrund der im 2. Hauptsatz der Thermodynamik beschriebenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten sind diese Potentiale betreibt sich auszugleichen. Da die Umgebung um ein Vielfaches größer und träger ist und eine größere Kapazität besitzt als das Innenraumklima, würden bei einem vollständigen Potentialausgleich der Innenraum und die Umgebung annähernd den klimatischen Zustand der Umgebung vor dem Ausgleich annehmen. Um dies zu verhindern, werden in Gebäuden verschiedene technische Maßnahmen vorgenommen. Diese verursachen ihrerseits einen noch größeren energetischen Potentialausgleich²¹, der aber von den Nutzern eines Gebäudes nicht thermisch, sondern höchstens finanziell spürbar ist, global gesehen aber zu einem beschleunigten Verlust an Exergie (=“Energieverbrauch“) führt.

Diese Maßnahmen lassen sich in drei Kategorien einteilen:

1. Verhindern des Potentialausgleichs durch Dämmmaßnahmen, analog zur Trennung der Elektroden einer Batterie
2. Minderung des Potentials durch Hinzuführung solarer Energie, dadurch verlangsamer bis hin zu völlig unterbundenem Potentialausgleich
3. Erzeugung neuer Potentiale durch Nachschub von Exergie aus Kraftwerken. Die verbrauchen jedoch an anderer Stelle mehr Exergie als sie für die Nutzung in Gebäuden erzeugen

Ein „energieeffizientes“ Gebäude besitzt also möglichst keine energetischen Gefälle gegenüber seiner Umgebung. In diesem Idealfall würde das Gebäude keine thermodynamischen Prozesse vollziehen, keine Exergie in Anergie umwandeln, also nach gemeiner Redensart auch keine Energie verbrauchen. Je mehr energetisches Gefälle besteht, desto größer ist der Aufwand, den Potentialausgleich entweder zu unterbinden oder neue lokale Potentiale zu generieren. Die Verhinderung des Potentialausgleichs durch Dämmmaßnahmen scheint auf den ersten Blick die beste Lösung zu

²¹das heißt Umwandlung von Exergie in Anergie und damit einhergehend Erzeugung von Entropie

sein. Allerdings ist dabei zu beachten, daß Dämmstoffe bei ihrer Produktion und Montage Energie verbrauchen²². Zum anderen können Gebäude aus verschiedenen funktionalen Gründen nicht vollständig thermisch gegen die Umwelt isoliert werden.

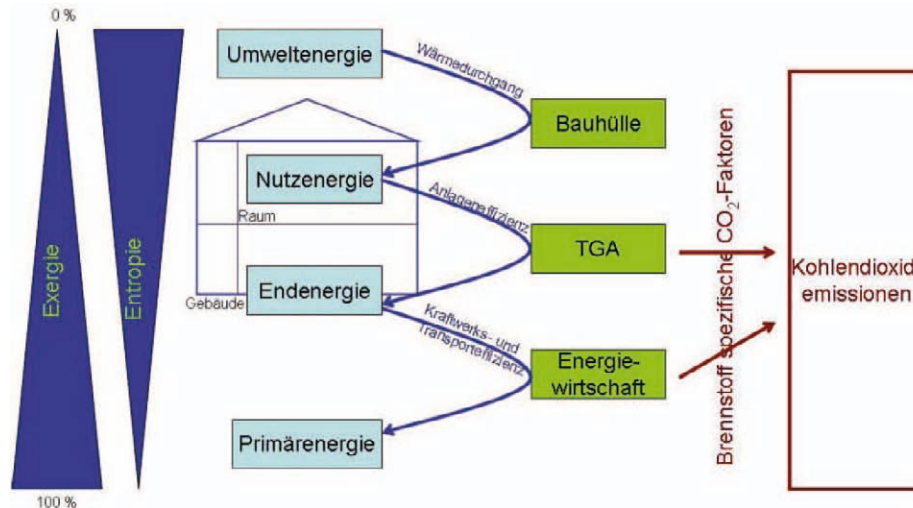


Abbildung 3.18: Energiekette und Bewertungsgrößen der Energie in Gebäuden[109]

Die oben erwähnten „Drei Säulen einer zukunftsfähigen Energiewirtschaft“ [65] lassen sich also physikalisch und thermodynamisch korrekt so formulieren, siehe auch Abbildung 3.18[109]:

1. Senkung des energetischen Potentialausgleichs und damit Senkung der Entropieproduktion
2. Bei technischen Vorgängen, die einen Potentialausgleich notwendig machen, sollte die Erzeugung von Anergie in Form von Abwärme vermieden oder zumindest reduziert werden.
3. Kraftwerke verbrauchen mehr Exergie als sie erzeugen. Daher sollte das natürliche zeitbasierte Exergieangebot der Sonne genutzt werden

Die technisch orientierte Beschreibung des Themas „Energieeffizienz“ sollte aber nicht dazu verleiten, daß Energieeffizienz allein durch planerische Maßnahmen zu optimieren ist. Ebenso wichtig ist ein optimiertes Nutzerverhalten[109], was Kenntnisse über physikalische und physiologische Zusammenhänge auf Seiten der Personen in Gebäuden voraussetzt.

3.4.1 Beispielhafte Gebäudetypen

Flughäfen

Flughäfen haben als Gebäudekomplexe des öffentlichen Verkehr die höchste Ähnlichkeit mit Personenbahnhöfen. Sie sind Verkehrsdrehscheiben mit einem hohen Reisendenaufkommen und vielen

²²Im folgenden Text wird weiter an der allgemein verbreiteten Ausdrucksweise „Energie verbrauchen“ festgehalten, auch wenn es unter thermodynamischen Gesichtspunkten nicht richtig ist und „Umwandeln von Exergie in Anergie“ heißen müßte. Lediglich in Sonderfällen, wie zum Beispiel dem Auskühlen eines Gebäudes, findet auch tatsächlich ein Energieverlust im Gebäude, aber ein Energiegewinn in der Umgebung statt

Beschäftigten. Flughäfen sind in der Regel größer als Bahnhöfe und besitzen mehrere Empfangshallen, die sogenannten „Terminals“. Allerdings ist der Öffnungsgrad nach außen nicht so hoch: Flugzeuge fliegen oder rollen nicht durch die Gebäude. Sie parken neben dem Flughafengebäude, und die Reisenden betreten die Flugzeuge durch mobile Schleusen, sogenannte „Gateways“. Fluggäste befinden sich vor dem Betreten eines Flughafens auch selten in einem städtischen Außenraum, sondern in einem Zug und unterirdischem Bahnhof, in einem privaten Kraftfahrzeug und Parkhaus oder Tiefgarage oder in einem Taxi. Des weiteren ist die Verweildauer der Reisenden in einem Flughafen wesentlich größer als in einem Bahnhof. Dies liegt unter anderem an den schärferen und langwierigen Sicherheitsmaßnahmen, am Check-In der Gepäckstücke sowie an höheren Zeitreserven, da Flugtickets in der Regel nicht übertragen werden können, wenn ein Flugzeug nicht erreicht wurde.

Ein Forschungsbericht der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen aus dem Jahr 1994 [53] beschreibt Maßnahmen, die Hausmeister, Facility Manager oder Nutzer von bestehenden Verkehrsstationen vornehmen können, um stationäre Energie zu sparen:

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Heizung<ul style="list-style-type: none">- abstellen- keine großen Flächen heizen- Heizzeit anpassen- Raumtemperatur senken• Brauchwasser sparen• Energiebewußtes Verhalten der Nutzer schulen• innere Wärmequellen nutzen• Verteilerverluste reduzieren durch<ul style="list-style-type: none">- Thermostatventile- Steuer-Regelrichter• Wirkungsgrad Wärmerzeugung erhöhen• Wärmerückgewinnung• Veraltete Anlagen (Heizkörper, Kessel) ersetzen | <ul style="list-style-type: none">• Effiziente, dezentrale Wärmeengewinnung<ul style="list-style-type: none">- Wärmepumpe- Sonnenenergie nutzen- Blockheizkraftwerk• Klima- und Lüftungsanlagen auf Jahreszeit einstellen• Beleuchtungsstärke reduzieren• Natürliches Licht nutzen• Regelmäßige Wartung der technischen Anlagen• Zeitschalter benutzen• Energieverbrauchsspitzen überwachen• Motorenabwärme nutzen• Gebäudeautomatisationssystem einsetzen |
|--|--|

Praktische Erfahrungen mit Energiesparprojekten werden bereits am Flughafen Frankfurt / Main gemacht. Grundlage des Energiemanagements beim Frankfurter Flughafen ist ein zuverlässiges Energie-Monitoring und -Controlling. Das ist angesichts der geographischen Nähe der einzelnen Objekte einfacher als bei den weit verstreuten Bahnhöfen.

Im Frankfurter Flughafen dominiert deutlich der Verbrauch von Strom, gefolgt von Fernwärme und sogar Fernkälte. Akkumulatoren garantieren die „unterbrechungsfreie Stromversorgung“ und können 15 Minuten lang Vollast liefern.

Die spezifischen Energiekennzahlen am Frankfurter Flughafen werden pro Verkehrseinheit, pro umbautem Raumvolumen und pro Beschäftigte ermittelt[107].

Der Münchner Flughafen erzeugt die Hälfte seines verbrauchten Stroms in Blockheizkraftwerken mit Gas-Diesel-Motoren und einem Wirkungsgrad von 80% bei gleichzeitiger Strom- und Wärmeerzeugung. Der restliche Strom wird über das öffentliche Netz bezogen. Die Wärmeerzeugung

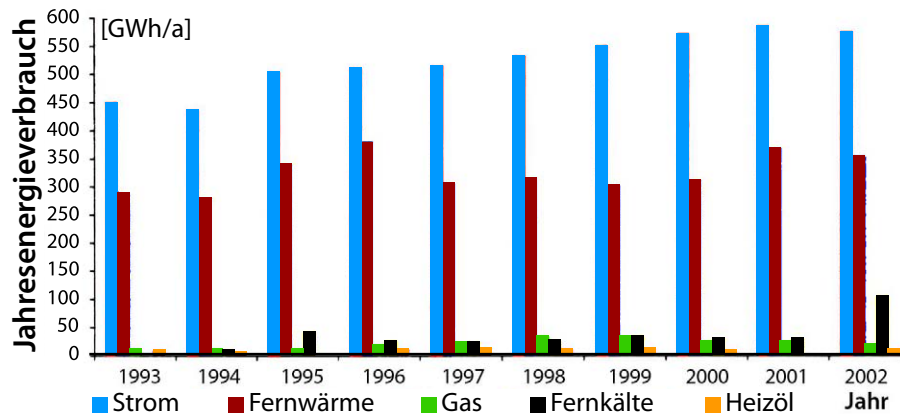


Abbildung 3.19: Energieverbrauch im Frankfurter Flughafen 2002 nach Energieträgern[107]

gliedert sich nach Grund-, Mittel- und Spitzenlast. Die Grundlast wird von den Blockheizkraftwerken getragen und in 130°C heißem Wasser gespeichert. Die Mittellast wird über zwei mittelbar beheizte Wärmetauscher getragen und die Spitzenlast durch eine Heißwasserkesselanlage. Der gesamte Energiebezug verteilt sich wie folgt: Strom (37%), Erdgas (41%), Fernwärme (15%) und Heizöl(7%). 59% davon verbraucht der Flughafen München selbst, 41% wird an externe Unternehmen weitergeleitet [111].

Die spezifischen Energiekennzahlen am Münchner Flughafen werden in Relation zu Verkehrseinheiten (VE), Passagieraufkommen (PAX), umbautem Raumvolumen (BRI) sowie Heizgradtagen nach VDI 2067 (Gradtagzahl GTZ) ermittelt.

Schulen

Neben Flughäfen können auch Schulen zur vergleichenden Analyse hinzugezogen werden. Es existieren folgende Gemeinsamkeiten bezüglich Energieverbrauch zwischen Bahnhöfen und Schulen:

- Hohe Bewegungsaktivität der Nutzer
- Hoher Nutzerwechsel in den einzelnen Räumen
- (Teil-) öffentliche Gebäude
- Erhöhte Sicherheitsvorschriften
- Hoher Bedarf an Licht

Allerdings existieren auch grundlegende Unterschiede:

- tägliche Nutzungsdauer
 - in der Schule nur vormittags und teilweise nachmittags
 - in Bahnhöfen auch morgens, abends und teilweise nachts
- In Schulen ist kaum Fördertechnik wie Aufzüge oder Rolltreppen vorhanden

Kaufhäuser

Kaufhäuser sind Bahnhöfen ebenfalls in vielen Punkten ähnlich. In einigen Fällen, wie zum Beispiel dem Leipziger Hauptbahnhof, ist die Ähnlichkeit sogar so groß, daß der Volksmund den Bahnhof als „Kaufhaus mit Gleisanschluß“ bezeichnet. Die Ähnlichkeiten liegen vor allem in der großen Zahl der Kunden, die täglich das Gebäude betreten, die relativ kurze Verweildauer, die damit einhergehende hohe Fluktuation und Öffnung nach außen. Hinzu kommt, daß Kaufhäuser auch Arbeitsplätze bereitstellen, seien es beratende Verkäufer oder Kassierer. Im Gegensatz zu Bahnhöfen werden Kaufhäuser durch dieselben Eingänge verlassen, durch die die Kunden die Gebäude betreten, es gibt also keine mit Bahnsteigen vergleichbaren Flächen. Stattdessen spielt die Kühlung von verderblicher Ware eine große Rolle hinsichtlich des Energieverbrauchs.

Beispiel Karstadt Die 180 Filialen²³ des Karstadt-Konzerns werden energetisch in vier Kategorien eingeteilt: Division 1 - 3 und Sporthäuser [112]. Die prozentuale Aufteilung des Energieverbrauchs nach Wärme, Strom und Wasser sieht erfahrungsgemäß wie folgt aus:

Energieträger	Verbraucher	Anteil
Wärme	Statische Heizung	25% - 30%
	RLT / Portale	60% - 70%
	Warmwasser	3% - 5%
Strom	Beleuchtung	35% - 40%
	RLT / Portale	25% - 30%
	Küche, Restaurant	12% - 15%
	Fördertechnik	5% - 08%
	Kältemaschinen	
	für Lebensmittel	10% - 12%
	für Lüftungsanlagen ²⁴	5% - 7%
	Fördertechnik	3% - 5%

3.4.2 Auswertung

Die Energieeffizienz von Gebäuden hängt an erster Stelle von architektonischen Parametern ab. Diesen bestimmen, ob überhaupt der Einsatz Energie verbrauchender technischer Anlagen nötig ist, um ein für die Funktion des Gebäudes angemessenes Innenraumklima zu schaffen. An zweiter Stelle steht daher die Anlagentechnik, ihre Dimensionierung, ihr Wirkungsgrad und ihre Einbindung in das Gebäude. Die Effizienz der Anlagen zeichnet sich nicht nur durch eine optimale Planung, sondern auch durch einen bedarfsgerechten und effizienten Betrieb aus. Das heißt, an dritter Stelle stehen der Betrieb und das Nutzerverhalten in einem Gebäude.

Die Vorgehensweisen zur Erlangung einer höheren Energieeffizienz teilt sich in zwei Strategien:

Bei der Bottom-Up-Methode werden neue Anlagentechnologien in Neu- oder Bestandsbauten eingesetzt und geprüft. Haben sie die gewünschte Energieeffizienz steigernde Wirkung, werden sie

²³Stand: 2004

daraufhin in größerem Umfang eingesetzt. Die Bottom-Down-Methode eignet sich eher für den Betrieb von bereits bestehenden Gebäuden. Hier werden zahlreiche Daten über längere Zeiträume in vergleichbaren Gebäuden gemessen und statistisch ausgewertet. Durch statistische Ausreißer können Fehler in der Technik oder im Nutzerverhalten aufgezeigt werden.

Eine Optimierung von Energieströmen ist nur unter Einbeziehung der Nutzer zielführend[109]. Beim Entwurf, der Errichtung und beim Betrieb eines Gebäudes sollten Planer, Nutzer, Bauherr, Betreiber und Bauausführer kommunikativ miteinander vernetzt sein.

Der Fokus der Aktivitäten hinsichtlich Energieeffizienz bei Gebäuden liegt eindeutig auf den Bereichen Bausubstanz und Technik. Die Bausubstanz, vor allem die Fassade mit ihrer Wärmedämmwirkung und Strahlungsdurchlässigkeit, als auch die Speicherfähigkeit des Gebäudes auf der einen Seite, die Heizungs- und Raumlufttechnik auf der anderen Seite bestimmen die Gesamtwärmebilanz eines Gebäudes und damit ein wichtiges Kriterium der Energieeffizienz. Bei beiden spielt die richtige Nutzung durch Menschen eine entscheidende Rolle.

Weitgehend unbeachtet bleiben strukturelle Ansätze wie Raumgliederung, die Ausbildung differenzierter Subklimazonen im Gebäude, das Strömungsverhalten im und am Haus, die Wirkung von starken Temperaturgefällen zwischen unterschiedlich klimatisierten Räumen, oder auch der Einfluß der Fensterreinigung auf das Tageslichtangebot in Innenräumen. Es findet also keine systemische Modellierung statt, sondern lediglich die Optimierung bestimmter technischer Anlagen oder Gebäudeteilen ohne Betrachtung des Gesamtsystems Gebäude.

3.5 Energieverbrauch in Bahnhöfen

Der Energieverbrauch in Bahnhöfen wird von einer ganzen Reihe an Kriterien beeinflusst. In dem Mindmap in Abbildung 3.20 werden verschiedene Kategorien als Knotenpunkte und Variablen als farbige Kästchen dargestellt. Beachtenswert ist die Tatsache, daß die Variablen nicht wie die Zweige und Blätter eines Baumes streng hierarchisch gegliedert sind, sondern Querbeziehungen existieren. Ein auf diesem Mindmap basierendes Modell hätte also einen rekursiven Charakter.

Von den einzelnen aufgeführten Kategorien werden zunächst die technischen Anlagen näher erläutert, da durch sie direkt Energie verbraucht wird.

3.5.1 Technische Anlagen

Um ein Gefühl dafür zu bekommen, warum und wofür Bahnhöfe überhaupt Energie verbrauchen, ist es hilfreich, sich einen groben Überblick über die technischen Anlagen in Bahnhöfen zu verschaffen. Schließlich sind sie die eigentlichen Energieverbraucher²⁵ Bei einem Blick auf Abbildung 3.21 fällt auf, daß in Bahnhöfen anders als in fast allen anderen Gebäudetypen der Verbrauch elektrischer Energie dominiert. Die Abbildung sagt zwar nichts über die quantitative Verteilung aus, internen Zahlen zufolge ist aber tatsächlich der Verbrauch elektrischer Energie

²⁵Die Menschen in Bahnhöfen sind mit ihrem Stoffwechsel auch Energieverbraucher und wandeln die chemische Energie der Nahrung in Wärme, kinetische Energie und Hubarbeit um.

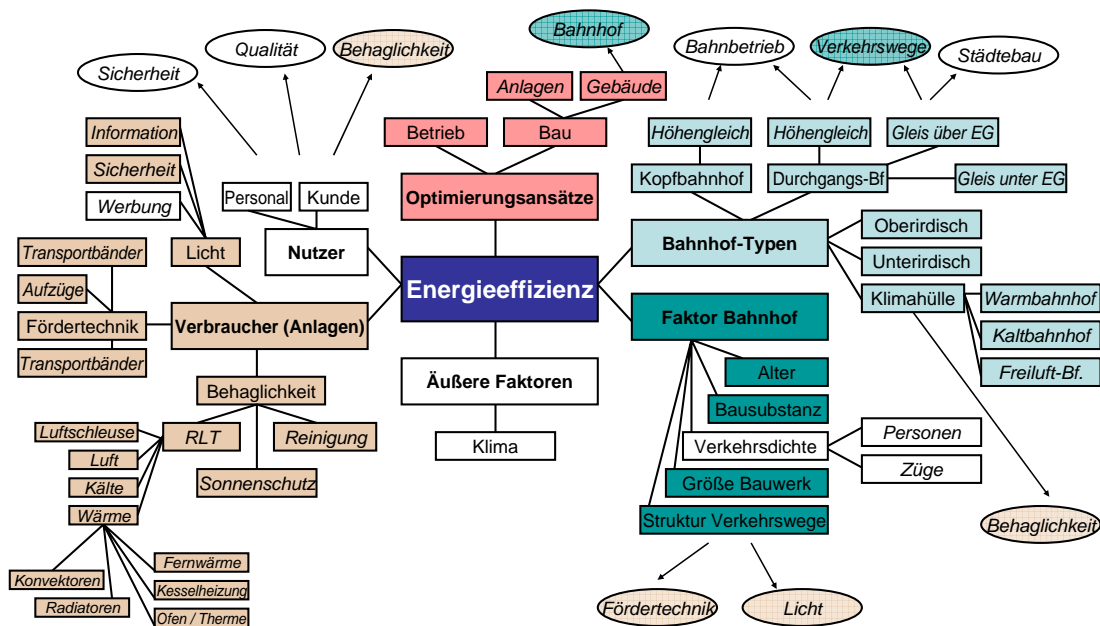


Abbildung 3.20: Mindmap über den Energieverbrauch in Bahnhöfen.

auch im stationären Bereich anteilig der größte. Differenziert man zwischen den beiden Hauptbereichen Verkehrsstation und Vermarktungsbereich, so kommt man zu dem Ergebnis, daß es im erstgenannten Bereich ausschließlich elektrisch betriebene Anlagen gibt, während die Versorgung mit Gas, Öl oder Fernwärme hauptsächlich für Gewerbeflächen im Vermarktungsbereich erfolgt. Empfangs- und Bahnsteighallen werden in der Regel weder beheizt noch gekühlt.

Die in Abbildung 3.21 dargestellten technischen Anlagen gibt es nicht in allen Bahnhöfen. Die am weitesten oben stehenden Anlagen haben den größten Verbreitungsgrad. Nichtelektrische Anlagen in der rechten Spalte und elektrische Anlagen für den Vermarktungsbereich gibt es vor allem in größeren Bahnhöfen.

Der größte Verbraucher elektrischer Energie ist die Gesamtheit aller Bahnsteigbeleuchtungsanlagen. Ein weiterer sehr großer Verbraucher im Empfangsgebäude ist, falls vorhanden, der Service-Point. Dessen Energieverbrauch setzt sich allerdings aus mehreren Teilkomponenten zusammen, wie Konvektions- und Strahlungsheizungen, Leuchtmittel und EDV.

Welche technischen Anlagen welchen Anteil am Gesamtenergieverbrauch eines Bahnhofs haben, ist bei jedem Bahnhof individuell verschieden.

Weitere wichtige Energieverbraucher sind Heizungs- und Lüftungsanlagen, Fördertechnik²⁶ sowie Fahrgastinformationsanlagen.

²⁶Dazu gehören Aufzüge, Fahrtreppen und Fahrsteige

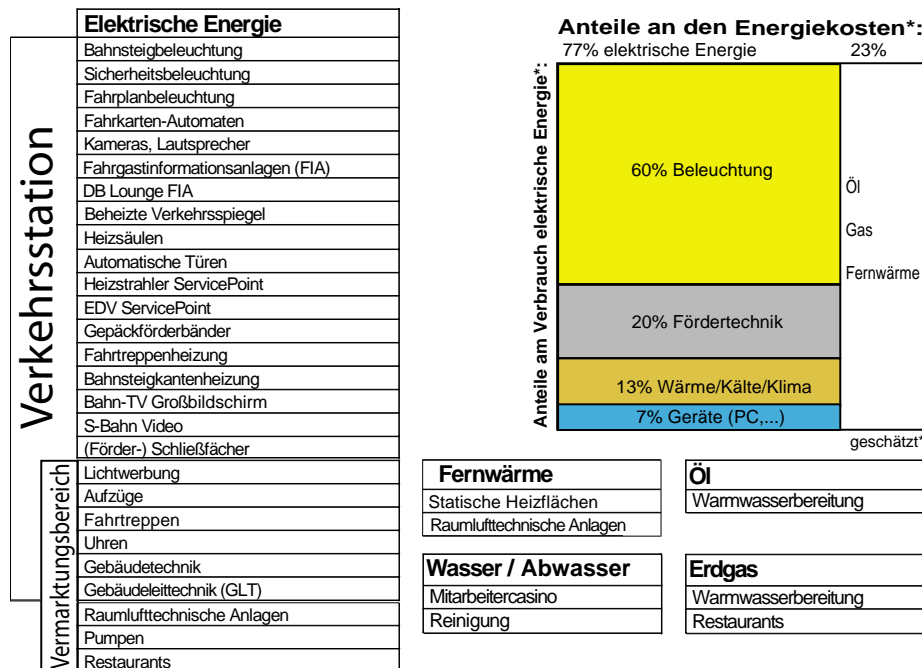


Abbildung 3.21: Technische Energieverbraucher in Bahnhöfen

3.5.2 Untersuchungen und Maßnahmen in der Praxis

Zu Beginn dieser Arbeit habe ich Anfragen über bestehende Erfahrungen zum Thema Energieeffizienz in Bahnhöfen an sämtliche Eisenbahninfrastrukturunternehmen Mittel- und Westeuropas, Japans und Nordamerikas verschickt. Lediglich die drei Bahnen im deutschsprachigen Mitteleuropa konnten in ihren Antworten bereits Projekte vorweisen. Die Maßnahmen und Projekte bei den Österreichischen und Schweizer Bundesbahnen sowie der Deutsche Bahn AG werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Österreichische Bundesbahn

Am Haltepunkt Meidling in Wien wurde die Senkung des Primärenergiebedarfs durch den Einsatz von Solartechnik und Windkraftanlagen vorangetrieben. Diese Maßnahme senkt zwar nicht den Energieverbrauch an sich, jedoch den Primärenergieeinsatz durch Erzeugung von Energie mit einem niedrigen Primärenergiekoeffizienten. Allerdings deckt die ÖBB sowieso schon 97% ihres Strombedarfs durch die Nutzung der heimischen Wasserkraft. Die Solaranlage von Meidling erzeugt 4.900 kWh Strom pro Jahr, das Windrad 3.900 kWh, wovon etwa 1.026 kWh Strom für den Bahnhof Meidling benötigt werden [41].

Um eine wesentlich größere Immobilie geht es bei dem Pilotprojekt „Umweltbahnhof Hauptbahnhof Linz“. Energiesparmaßnahmen werden dort unterstützt durch Umweltmanagement-Handbuch und Merkblätter, die öffentlich ausgehängt Mitarbeiter und Kunden vor Ort über bestimmte

Verhaltens- und Arbeitsweisen informieren. Die Stromversorgung des Hbf Linz betrug 1997 7,900 GWh und stieg bis zum Jahr 2000 auf 9,459 GWh an [42]. Finanziell gesehen ist jedoch nicht der Gesamtverbrauch sondern die Lastspitzen zur Hauptverkehrszeit zwischen 7 Uhr morgens und 11 Uhr problematisch. Um diese zu reduzieren, wird der Bahnhof Linz über einen Zentralrechner von einer Energieoptimierungsanlage gesteuert und überwacht.

Schweizer Bundesbahn

Die Schweizer Bundesbahn (SBB) unternimmt ebenfalls parallel *Top-Down* und *Bottom-Up* - Analysen, um die Energieeffizienz ihrer Bahnhöfe und sonstigen Betriebsgebäude zu erhöhen.

Neben den technischen Analysen, die als Richtlinien in die Pflichtenhefte und Regelwerke eingehen, sieht die SBB vor allem Weiterbildungen für Hausmeister und Technische Dienste als effiziente Energiesparmaßnahme, siehe dazu Abbildung 3.22.

Umsetzungsschritt (Wirkung)	Einsparung bei den betroffenen Objekten [Strom und Wärme]	Anteil der betroffenen Objekte am beeinflussbaren Gesamtverbrauch	Einsparung beim beeinflussbaren Gesamtverbrauch [Strom und Wärme]
Feinanalysen Erzielen von Einsparungen durch Erkennen von Synergien und Abhängigkeiten zwischen bestehenden und neuen Gebäudeteilen und Anlagen	10 %	10 %	1,0 %
Planungsrichtlinien Vermeidung überdimensionierter Anlage und energetisch optimierte Planung	5 %	10 %	0,5 %
Betriebsoptimierung Pflichtenheft Anlage an konkrete Gegebenheiten anpassen und damit Anlagenverschleiß sowie Energieverbrauch reduzieren	10 %	10 %	1,0 %
Weiterbildung Hausmeister	8%	20 %	1,6%
Weiterbildung Technische Dienste	8%	30 %	2,4%
Gesamteinsparung			6,5 %

Abbildung 3.22: Aus dem Umsetzungsprogramm „Energie in Hochbauten“ der SBB[72]

Des Weiteren informiert die Schweizer Bundesbahn in ihren Umweltberichten 1999 und 2000 / 2001 über den Energiebezug aus Wasserkraft, die Rückspeisung elektrischer Energie bei Talfahrten von Zügen, den Einfluß der Vorhaltung von Raucherbereichen auf den Energieverbrauch für Lüftung und Luftklimatisierung und Erneuerungsprogramme von Heizungsanlagen.

Deutsche Bahn AG

Am Energiemanagement für Liegenschaften sind bei der Deutschen Bahn AG jeweils drei Konzerngesellschaften beteiligt, um durch die Bündelung von Fachwissen und Kompetenzen in einzelne Bereiche ein organisatorisches Optimum zu erreichen.

Erster Beteiligter ist die jeweilige Eigentümergesellschaft und Betreiberin der Gebäude. Im Falle der Bahnhöfe ist das die DB Station&Service AG, bei fast allen anderen Objekten die DB Immobilien GmbH. Diesen Gesellschaften obliegt das strategische Energiemanagement, also vor allem das Datenbankmanagement für Gebäude, technische Anlagen und Verbrauchszahlen. Zentraler Wissensträger für Energiesparmaßnahmen ist die DB Energie GmbH für sämtliche Gebäude der Deutschen Bahn AG. Als Dritter interner Partner steht der Unternehmensbereich Technische Dienste zur Verfügung, der für die großflächige Erfassung energierelevanter Daten und die technische Umsetzung von Energiesparmaßnahmen sowie Wartung und Instandhaltung verantwortlich ist.

Folgende Ansätze werden unter anderem hinsichtlich der Einsparung von Energie verfolgt:

- Energie-Audits, Begehungen und Vor-Ort-Untersuchungen von ausgewählten Bahnhöfen
- Austausch von Leuchtröhren und Einsatz von Energiespar-Adaptern
- Verkürzung von Bahnsteigen und Nutzung von doppelstöckigen Regionalzügen
- Stilllegung von Bahnsteigen
- Anreizsysteme für Energiesparmaßnahmen durch interne Bepreisungsmodelle
- Benchmark von Technischen Anlagen mit Hilfe zentraler Datenbanken
- Controlling der Nebenkostenabrechnungen

Auch im Fahrbetrieb der Bahn gibt es Energiesparmaßnahmen, wie zum Beispiel Schulungen für energiesparende Fahrweise oder die Rückspeisung elektrischer Energie beim Bremsvorgang von Triebfahrzeugen.

3.5.3 Auswertung

Die Umsetzung von Energiesparmaßnahmen bei Personenbahnhöfen erscheint aus zwei Gründen schwieriger als bei den in der Literatur behandelten Gebäudetypen Wohn- oder Bürohaus:

1. Energiesparmaßnahmen erfordern zunächst einen finanziellen Aufwand für Planung und (Um-)bau. In der komplexen Organisationsstruktur der Bahn²⁷ sind die Finanzierer der *Investitionen* und Nutznießer der Einsparungen nicht identisch, wenngleich sie demselben Konzern angehören. Aufgrund dieses *organisatorischen Mangels* existiert ein Anreizproblem. Hinzukommt, daß Bahnhofsbauten noch stärker als Wohn- oder Bürogebäude *Unikatcharakter* besitzen. Es ist also nicht möglich, Kennwerte oder Planungen für einen Bahnhof auf den restlichen Bestand auszuweiten. Hinzu kommt, daß viele Bahnhöfe unter Denkmalschutz stehen und es daher Restriktionen bei Sanierungsmaßnahmen gibt.
2. Auch hinsichtlich des Betriebs gibt es ein *Anreizproblem*. Die Hauptnutzer von Bahnhöfen sind Reisende, die nur indirekt über Ticketpreise und ökologische Folgen unnötigen Energieverbrauch in Bahnhöfen zu spüren bekommen. Da sie während der Nutzung eines Bahnhofs zumeist in Eile sind, ist nicht zu erwarten, daß sie sich besonders energiebewußt verhalten. Die Bediensteten in Bahnhöfen bekommen die Auswirkungen von unnötigem Energieverbrauch ebenfalls kaum zu spüren. Vielmehr ist ihnen an ihrer eigenen Gesundheit und Behaglichkeit gelegen, sodaß auch hier keine besonders große Eigenmotivation für energiesparendes Verhalten vermutet werden kann. Die Personen im Management der Bahnhöfe,

²⁷in Deutschland

welche den Energieverbrauch von Bahnhöfen direkt in ihrem Budget zu spüren bekommen, sind räumlich und organisatorisch zu weit weg von „ihren“ Bahnhöfen, die sie zumeist gar nicht selbst persönlich betreten. Während vor Ort viele Menschen einen Bahnhof benutzen, sieht es im Management umgekehrt aus: Ein Mensch bewirtschaftet und betreibt viele Bahnhöfe.

In vielen Bahnhöfen ist die Gesamtheit der Bahnsteigbeleuchtungsanlagen der größte Energieverbraucher. Dies könnte zu dem Schluß verleiten, daß das Thema Energieeffizienz in Personenbahnhöfen mit einer Untersuchung über Einsparmöglichkeiten bei Bahnsteigbeleuchtungsanlagen weitgehend erledigt werden könnte und alle anderen Energieverbrauchsarten marginal seien.

Führt man sich jedoch vor Augen, was die Motivation für den Betrieb einer technischen Anlage ist, fällt das Ergebnis anders aus: Bahnsteigbeleuchtung gilt als „sicherheitsrelevant“ und wird daher von der Aufsichtsbehörde²⁸ vorgeschrieben und überprüft. Heizung, Kühlung, Lüftung, Klimatisierung, Fördertechnik wie Aufzüge, Fahrtreppen und Gepäckförderbänder sind gesetzlich nicht zwingend, sondern werden mehr oder minder *freiwillig* angeboten. Ist man also aus politischen oder wirtschaftlichen Gründen zu Energiesparmaßnahmen gezwungen, hätte das Abschaffen sicherheitsrelevanter Technik weitaus größere Folgen, nämlich Sanktionen einer Aufsichtsbehörde, als die vereinzelt Sanktionen von Kunden, die das Abschaffen komfortrelevanter Technik nicht gutheißen. Natürlich sprechen nicht nur behördliche Sanktionen, sondern Gefahrenabwehr und das Vermeiden von Unfällen gegen das Abschaffen oder Abschalten sicherheitsrelevanter Technik.

Man sieht an der Verteilung des Energieverbrauchs auf Anlagentypen und Bahnhofstypen, wann welche unternehmerische Schmerzgrenze bei Energiesparmaßnahmen erreicht wird. Bei den vielen kleinen Bahnhöfen mit wenigen Kunden spielt Komfort praktisch keine Rolle, während die Sicherheitsbestimmungen genauso hoch sind wie bei jedem anderen Bahnhof auch. Daher macht auf diesen Stationen die Bahnsteigbeleuchtung weit mehr als die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs aus. In großen Prestigebahnhöfen mit vielen Reisenden ist die Schmerzgrenze für die Betreiber, aufgrund eines schlechten Komforts potentielle Kunden zu vergraulen, wesentlich höher, sodaß hier der relative Anteil des Energieverbrauchs für Bahnsteigbeleuchtung deutlich geringer ist oder, anders gesprochen, komfortrelevante Anlagentechnik einen sehr hohen Energieverbrauch aufweist. Dies ist aber zu kurz gedacht, da die meisten Reiseketten nicht in den Prestigebahnhöfen beginnen und enden, sondern diese nur zum Umstieg nutzen. Ein Reiseweg, der in einem der vielen Kleinbahnhöfe ohne Komfortanspruch beginnt und in einem Prestigebahnhof mit einem hohem Komfortniveau endet, erzeugt ein sehr ambivalentes Gesamtbild.

Energieverbrauch in Bahnhöfen hängt nicht nur von technischen Parametern wie bei anderen Gebäudetypen ab, sondern auch von

- der besonderen Struktur,
 - die verschiedene Klimazonen umfaßt, welche graduell dem Innen- und Außenbereich zuzuordnen sind
 - den daraus resultierenden „internen Fassaden“ (Klimagrenzen)
 - dem hohen Öffnungsgrad nach außen, hervorgerufen durch die große Fluktuation von Kunden und Reisenden
 - Unikatcharakter

²⁸in Deutschland ist das Eisenbahnbundesamt

- dem besonderen *Rollenmodell*, bestehend aus
 - Reisenden und Kunden mit hoher Aufenthaltsdauer, Wartenden
 - Reisenden in Eile mit niedriger Aufenthaltsdauer
 - Service- und Vertriebsangestellten ohne Einfluß auf die Gebäudetechnik
 - Technischen Angestellten ohne Partizipation am wirtschaftlichen Erfolg des Bahnhofs
 - Bahnhofsbetreibern ohne physische Präsenz im Bahnhof
- unterschiedlichen Anreizen
 - Sicherheit: höchster Verpflichtungsgrad
 - Kurzfristige Wirtschaftlichkeit
 - Langfristige Wirtschaftlichkeit
 - indirekte Effekte
- und den unterschiedlichen Rollen verschiedener Bahnhöfe

3.6 Modelle

Modelle werden in verschiedenen Wirtschafts- und Industriezweigen als Planungswerkzeuge eingesetzt. Sie können aus Daten und mathematischen Algorithmen bestehen, oder ein vereinfachtes und skaliertes physisches Abbild der Wirklichkeit sein. Als Beispiele seien digitale Architekturvisualisierungen und Architekturmodelle aus Holz, Pappe und Plexiglas genannt. Ein Übersicht über verschiedene Planungswerkzeuge gibt Abbildung 3.23.

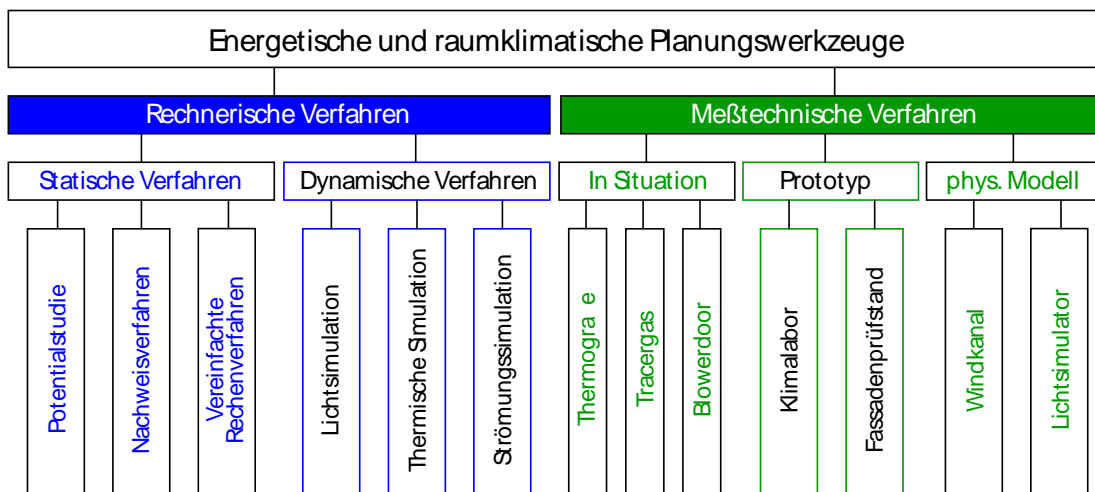


Abbildung 3.23: Werkzeuge im integrierten Planungsprozeß nach [79]

In diesem Abschnitt werden Modelle aus verschiedenen Publikationen beschrieben und diskutiert, die vorbildhaften Charakter für neue, speziell für diese Arbeit entwickelte Modelle haben oder in Form eines Softwarepaketes direkt eingesetzt werden.

3.6.1 Definition: Systeme und Modelle

Folgende Sätze beschreiben, was mit den Begriffen *System* und *Modell* gemeint ist:

1. Ein System ist ein Teil der Wirklichkeit
2. Ein Modell ist ein (vereinfachtes) Abbild eines Systems
3. Ein System ist die Gesamtheit von Teilen, die zueinander und zur Umwelt in einer Beziehung stehen.
4. Das System ist durch eine Systemgrenze von der Umwelt getrennt.
5. Die Wahl der Systemgrenze ist willkürlich:
 - So groß, daß das System als Einheit eine Wirkung hat.
 - So klein, daß es modellierbar und numerisch beherrschbar ist.
6. Modelle bestehen aus
 - Variablen
 - Beziehungen zwischen den Variablen
 - Randbedingungen
7. Ein System ist in Teilsysteme abgrenzbar

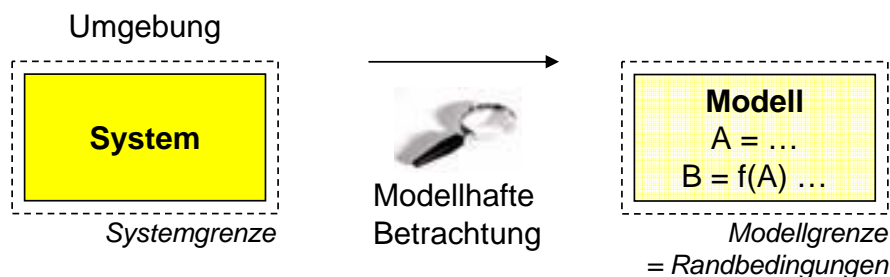


Abbildung 3.24: Beziehung von Systemen und Modellen

3.6.2 Sensitivitätsmodell nach Frederic Vester

Das von Vester in seinem Buch „Die Kunst vernetzt zu denken“ [80] präsentierte Sensitivitätsmodell liefert Werkzeuge, um das Verhalten von komplexen Systemen begreifbar zu machen. Mit diesem Wissen sollen die Systeme so gesteuert werden, daß sie durch ihre Eigendynamik und ohne energieintensive Fremdeinwirkung gewünschte Systemzustände erreichen.

Der erste Schritt besteht darin, komplexe Systeme überhaupt als solche zu erkennen. So wird sichergestellt, daß in der Verhaltensanalyse keine Nebenwirkungen unbeachtet bleiben, was bei Situationsanalysen häufig der Fall ist.

Ein System ist nach Vester ein Netz aus *Zuständen* und *Wirkungen*. Daher besteht ein Modell als vereinfachtes Abbild eines Systems ebenfalls aus diesen Komponenten, die im mathematischen Kontext *Variablen* und *Funktionsvorschriften* genannt werden.

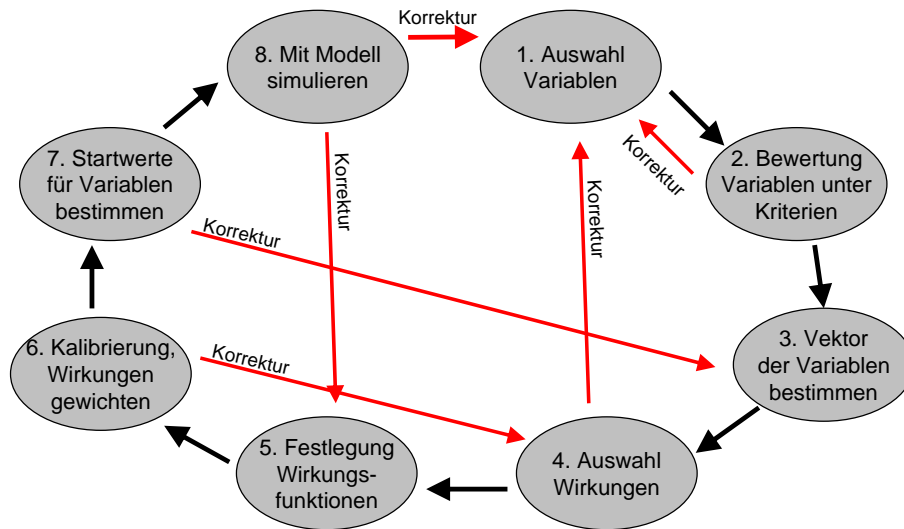


Abbildung 3.25: Die Modellbildung ist ein iterativer Prozeß

Die Kunst des Modellierens besteht also darin,

1. die relevanten Variablen zu finden,
2. diese effizient zu vernetzen und
3. für die Verbindung geeignete, das heißt möglichst nah die Wirklichkeit abbildende Funktionsvorschriften zu finden.

Aus der begrenzten Anzahl von Variablen und Funktionen in Modellen ergibt sich die Simulation mit Hilfe der Numerik. Durch die *willkürliche* Wahl der Variablen und Formeln bleibt das Ergebnis eine mögliche Variante und wird nicht allgemeingültig. Der Aufbau eines Modells hat also einen erheblichen Einfluß auf das (Konvergenz-) Verhalten während der Simulation, auf das Ergebnis und auf die Nähe zum realen System. Beim Testen des Modells kann die Auswahl daher jederzeit wieder verändert werden. Der Prozeß des Modellbildens wird vereinfacht in Abbildung 3.25 dargestellt.

Auswahl der Variablen

Es gibt Variablen, die mathematisch beschreibbare Zustandsgrößen besitzen, wie zum Beispiel finanzielle und physikalische Größen, sowie solche, die einen weichen, nicht eindeutig bezifferbaren Charakter haben. Dazu gehören psychologische, soziologische und physiologische Größen. Die weichen Variablen bekommen durch ihre Beziehungen zu harten Größen auswertbare Wirkungen.

Die Anzahl der Variablen hat ein bestimmtes Optimum. Ist die Auswahl zu klein, verhält sich ein numerisches Modell deterministisch. Modelle mit zu vielen Variablen konvergieren in der Regel nicht.

Vernetzung

Werden alle Variablen miteinander verknüpft, wird das Modell numerisch unterbestimmt und konvergiert nicht. Werden hingegen zu wenige Variablenverknüpfungen übernommen, dann verhält sich das numerische Modell deterministisch und realitätsfern. Die Kunst liegt also darin, die Verknüpfungen für ein numerisches Modell so zu wählen, daß es komplexe Vorgänge abbilden kann und trotzdem stabil²⁹ läuft.

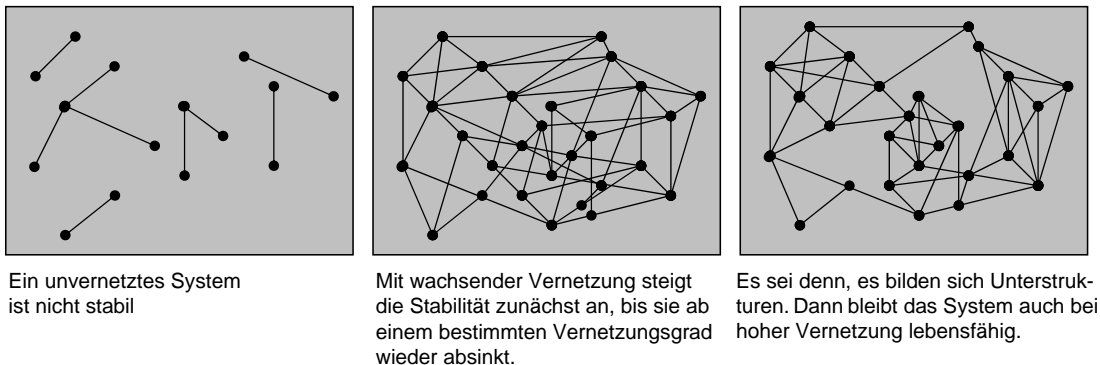


Abbildung 3.26: Vernetzung von Modellvariablen[80]

Bestimmung der Funktionsvorschriften

Die Wahl adäquater mathematischer Funktionen für jede einzelne Wirkung zwischen Variablen ist sicherlich der komplizierteste und schwierigste Teil der Modellierung. Vester nähert sich einer Lösung in zwei Schritten an[80].

In der ersten Näherung sind die Funktionsvorschriften binär, es gibt also sowohl im Definitionsbereich als auch im Wertebereich jeweils nur zwei Werte. Daraus resultieren folgende vier mögliche Zuordnungen³⁰:

Sender	Empfänger	Wirkung
steigt	steigt	gleichgerichtet
steigt	sinkt	gegengerichtet
sinkt	steigt	gegengerichtet
sinkt	sinkt	gleichgerichtet

Dadurch ergeben sich wie in Abbildung 3.27 innerhalb eines Modells positive und negative Rückkopplungen. Bilden zwei gleichgerichtete oder zwei gegengerichtete Wirkungen einen geschlossenen Wirkungskreis, so liegt eine positive Rückkopplung oder auch selbstverstärkender Regelkreis

²⁹In der numerischen Mathematik heißt ein Verfahren stabil, wenn es gegenüber kleinen Störungen der Daten unempfindlich ist. Insbesondere bedeutet dies, dass sich Rundungsfehler nicht zu stark auf die Berechnung auswirken

³⁰Genau genommen werden hier die ersten Ableitungen miteinander verglichen, nicht die Funktionswerte selbst

vor, der die Gefahr einer unkontrollierten Entwicklung der Variablen gegen plus oder minus Unendlich birgt. Schließen sich je eine gleichgerichtete und eine gegengerichtete Wirkung zu einem Kreis, entsteht eine negative Rückkopplung mit den Eigenschaften eines stabilisierenden Regelkreises. Die Variablen eines solchen Regelkreises streben nicht gegen Unendlich, sondern konvergieren oder pendeln um einen stationären Wert. Die Beispiele in Abbildung 3.27 sind sehr überschaubar und daher deterministisch. In Modellen mit über 20 Variablen gibt es in der Regel mehrere ineinandergreifende Regelkreise, die jeweils auch mehr als zwei Variablen einschließen. Die Frage, ob ein bestimmter Regelkreis *konvergiert*, *schwingt* oder *divergiert*, läßt sich bei großer Komplexität nicht mehr aus der Anschauung beantworten. Dazu sind iterative Verfahren nötig, die von Computern ausgeführt werden.

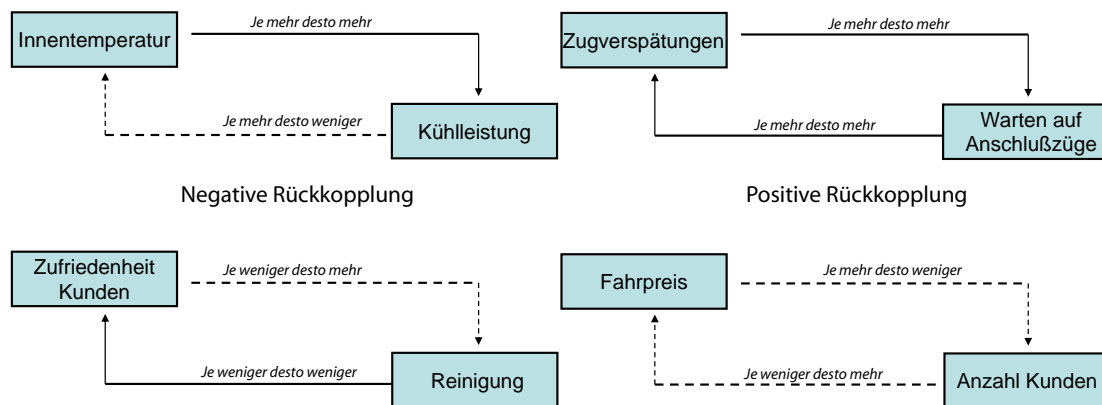


Abbildung 3.27: Beispiele für selbstverstärkende und stabilisierende Regelkreise

Diese einfachen qualitativen Funktionsvorschriften lassen sich erweitern um folgende Funktionen:

Sender	Empfänger
extrem hoch oder extrem niedrig	steigt
extrem hoch oder extrem niedrig	sinkt
mittlerer Wert	steigt
mittlerer Wert	sinkt

Welche Funktionsvorschriften tatsächlich hinter den einzelnen Wirkungen stecken, wird in [80] nicht beschrieben. Die Auswahl möglicher Funktionen ist unendlich groß, außerdem hängen die tatsächlichen Formeln sehr individuell von den zu verbindenden Variablen ab. Patentlösungen gibt es nicht.

Handelt es sich um die Wirkung zwischen zwei physikalischen Variablen, kann man mit experimentellen Methoden den mathematisch funktionalen Zusammenhang ermitteln. Die Erfahrungen und Ergebnisse solcher Experimente findet man in Lehrbüchern wie [16] und [18].

Sind psychologische oder soziologische Variablen in den Modellen vorhanden, können mit Erhebungen und Befragungen und deren statistischen Analysen Zusammenhänge erkannt und mathematisch formuliert werden. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen beschreibt beispielsweise Fanger in [8]

Liegen gar keine empirischen Erhebungen vor, so kann man mit alternativen Annahmen das qualitative Verhalten verschiedener Modellvarianten untersuchen. Allerdings liefert diese Methode keine belastbaren Zahlen, sondern lediglich Auskunft über das Vorhandensein beachtenswerter indirekter Wirkungen oder selbstverstärkende Regelkreise.

Die Funktionen zwischen den Variablen können häufig als Lösungen von Differentialgleichungen beschrieben werden. Dann ist eine Simulation des Modellverhaltens mit diskreten Zeitschritten möglich. Das Resultat kann Konvergenz, Divergenz oder Schwingung sein. Variablenbeziehungen, die auf einfachen Funktionen oder Differentialen beruhen, zeigen keine zeitliche Veränderung, sondern streben ein Gleichgewicht an oder divergieren in einzelnen Variablen.

Mit der Wahl der Funktionsvorschriften wird ein weiteres Rollenmerkmal für Modellgrößen gesetzt: *Antreibende* und *dämpfende* Variablen.

3.6.3 Simulation vs. Optimierung

Rolfsman[66] betont die Unterscheidung zwischen Simulation und Optimierung:

Simulation Alle Parameter werden gesetzt, das Ergebnis hängt von den kausalen Zusammenhängen ab. Dieses kann mit Meßwerten überprüft werden.

Optimierung Es werden so wenig wie möglich Vorgaben gemacht, nur äußere Grenzen, z.B. physikalische. Das Modell kann in den Grenzen dann beliebig minimieren und maximieren. Dadurch kann das Optimierungsmodell Lösungen bringen, an die der Mensch nie gedacht hätte. Das Problem ist die Überprüfung. Das Optimierungsmodell muß also genau analysiert und unter die Lupe genommen werden.

Zu der systemischen Herangehensweise gehört auch das Testen auf indirekte Effekte, wie schon in Abschnitt 3.6.2 angesprochen.

Rolfsman nennt beispielhaft den Zusammenhang von Licht und Wärme, da bei dem Einsatz von Energiesparleuchten mit hohem Wirkungsgrad in der Heizperiode mit einer zusätzlichen Heizleistung zu rechnen ist. Des weiteren stellt er Systeme mit hohen Investitionen und niedrigen Betriebskosten Systemen mit niedrigen Basiskosten aber hohen Betriebskosten gegenüber. Außerdem analysiert und diskutiert er das Phänomen von Lastspitzen, die aus der Kombination von Energiebedarf und Energiebereitstellung resultieren.

Bei der dynamischen Simulation oder Optimierung eines derart komplexen Systems stellt sich natürlich die Frage nach der zeitlichen Auflösung der Rechenintervalle. Klima und Energieverbrauch, aber auch Kosten und Preise verändern sich in der Wirklichkeit mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Einem hohen Rechenaufwand bei kleinen Intervallen (mit hohen Kosten und einem riesigen, kaum zu beherrschenden Datenberg) stehen mögliche Fehler und Ungenauigkeiten gegenüber, vor allem, wenn es darum geht, die stark unterschiedlichen Bedürfnisse und Parameter der Tageszeiten (Tag, Nacht, Übergang) sowie der Jahreszeiten (Temperaturen, Sonnenlichtdauer pro Tag) einzubeziehen. Rolfsman kommt zu dem Ergebnis, daß Intervalle von 3 Stunden, also 8 Messungen täglich, optimal sind. Dabei spielt es eine Rolle, ob Parameter wie Temperatur, Energiebedarf und Energiepreise zueinander parallel oder sogar synchron veränderlich sind.

3.6.4 Komfortmodell nach P.O. Fanger

Studien zu Komfort und Behaglichkeit bestehen in der Regel aus einer gemeinsamen statistischen Auswertung von physikalischen Messungen und Befragungen von Menschen in den zu untersuchenden Umgebungen. Zu unterscheiden sind dabei *Feldstudien* und *Laborstudien*. In Feldstudien werden Personen in realen Umgebungen befragt und die physikalischen Rahmenbedingungen gemessen. In Laborstudien werden die gewünschten physikalischen Rahmenbedingungen künstlich geschaffen und mit den Bewertungen verglichen. Der Vorteil der Feldstudien liegt darin, daß dafür kein kostenintensives Labor nötig ist und daß relativ viele Probanden befragt werden können. Von Nachteil ist aber die Zufälligkeit der physikalischen Rahmenbedingungen und die möglicherweise fehlende Vergleichbarkeit zwischen den Erhebungen.

Des weiteren gibt es *longitudinale* und *transversale* Erhebungen [101]. Bei Longitudinalerhebungen werden relativ wenige Probanden über einen langen Zeitraum befragt und beobachtet. Bei transversalen Erhebungen liegt der Schwerpunkt auf einer möglichst breiten Momentaufnahme.

Vor der Entwicklung eines neuen Komfortmodells um das Jahr 1970 gab es nur drei grundlegende Behaglichkeitskriterien:

1. optimale Raumtemperatur
2. zulässige Luftfeuchte
3. Luftgeschwindigkeit

Stillschweigend vorausgesetzt wurden hingegen durchschnittliche Bekleidung und Aktivität.

Stationäre thermische Verhältnisse

In der DIN EN ISO 7730 wird basierend auf dem Fangerschen Modell [8] ein Bewertungsmodell für *klimatisierte* Räume vorgeschlagen [35]. Das von P.O. Fanger in den 1970er Jahren entwickelte Komfortmodell berechnet eine Wärmebilanz für menschliche Körper in einer baulichen, klimatisierten Umgebung und gibt somit Auskunft darüber, ob sich der Körper in einem thermischen Gleichgewicht befindet. Folgende Größen beeinflussen die Wärmebilanz und gehen daher als Eingangsgrößen in die Berechnung ein:

- Körperliche Tätigkeit in [met] bzw. $[W/m^2]$ ³¹
 - davon wirksame mechanische Arbeit in $[W/m^2]$
- Bekleidung
 - Bekleidungsisolations in $[m^2K/W]$
 - Oberflächentemperatur der Bekleidung in $[^{\circ}C]$
 - Bekleidungsflächenfaktor ³²
- Umgebungsklima
 - Lufttemperatur in $[^{\circ}C]$
 - mittlere Strahlungstemperatur in $[^{\circ}C]$
 - relative Luftgeschwindigkeit in $[m/s]$
 - relative Luftfeuchte (Wasserdampfpartialdruck) in [Pa]

³¹ Alternative Bezeichnungen: Stoffwechsel, Metabolismus, Energieumsatz

³² berechneter Wert

- konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in $[W/m^2K]$ ³³

Da sich meistens mehrere Personen mit unterschiedlichem Wärmeempfinden in einem Raum befinden, liefert das Fangersche Modell zunächst das *vorausgesagte mittlere Votum* (predicted mean vote = PMV), also die höchstwahrscheinlich durchschnittliche Bewertung des Wärmeempfindes in dem betreffenden Raum. Die genaue Formel läßt sich in [8] und [35] nachlesen³⁴. Der PMV-Index wiederum läßt sich in den PPD-Index transformieren, der angibt, wieviel Prozent der Menschen in dem betreffenden Raum mit dem Klima unzufrieden sein werden (predicted percentage of dissatisfied). Über die Funktionsvorschrift $PPD = f(PMV)$ gibt es verschiedene Ansichten unter den Wissenschaftlern. Fanger selbst sieht den geringsten Prozentsatz Unzufriedener bei einem temperaturneutralen Klima $PMV=0$. Die Funktion ist überdies symmetrisch zur Stelle 0:

$$PPD = 100 - 95e^{-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2}$$

Nach Fanger sind mindestens 5% aller Menschen in einem Raum unzufrieden mit dem Raumklima. Andere Modelle sehen sogar einen noch höheren Mindestprozentsatz an Unzufriedenen vor³⁵. Richter[89] wendet diese 95%-Regel nicht an, da die thermischen Bedingungen im Raum heterogen und ortsabhängig sind und kein repräsentativer Wert für gesamte Räume gebildet werden sollte. Stattdessen fordert er die Berücksichtigung globaler *und* lokaler Kriterien.

PMV	+3	+2	+1	+0,5	0	-0,5	-1	-2	-3
Empfinden	heiß	warm	Leicht warm		neutral		leicht kühl	kühl	kalt
PPD	90%	75%	25%	10%	5%	10%	25%	75%	90%

Abbildung 3.28: Zusammenhang zwischen PPD und PMV nach P.O. Fanger[92]

Das Fangersche Modell ist allerdings für klimatisierte Räume und Temperaturen zwischen 10°C und 30°C sowie Luftgeschwindigkeiten bis zu 1m/s ausgelegt. Diese Voraussetzungen erfüllen Bahnhofsgebäude nicht immer, Bahnsteighallen sogar fast nie. Allerdings gibt es in der neueren Literatur Ansätze, die versuchen, das Fangersche Modell auf frei belüftete Gebäude modifiziert zu übertragen.

Die thermische Behaglichkeit ist jedoch nicht nur von der operativen Temperatur, sondern auch von dem Zugluftrisiko, vertikalen Lufttemperaturunterschieden, warmen und kalten Fußböden sowie Strahlungsasymmetrien abhängig.

Das Zugluftrisiko (Draught risk = DR) wird berechnet aus

³³berechneter Wert

³⁴Ein Teil der Gleichnung läßt sich nicht analytisch, sondern nur numerisch iterativ annähern. Dieses Verfahren ist für Echtzeitsimulationen häufig zu langsam. Daher empfiehlt [113] den Einsatz von *neuronalen Netzen*

³⁵Siehe dazu Abbildung 3.28, Quelle: Rietschel - Raumklimatechnik, 16. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1994

- der lokalen Lufttemperatur in $^{\circ}\text{C}$, zwischen 20°C und 26°C
- der mittleren Luftgeschwindigkeit in $[\text{m/s}]$, unter $0,5 \text{ m/s}$
- dem lokalen Turbulenzgrad in $[\%]$, zwischen 10% und 60%

$$DR = (34 - T_L)(\bar{v} - 0,05)^{0,62}(0,37\bar{v}T_u + 3,14)$$

$$T_u = 100\%s_v/\bar{v}$$

DR	$[\%]$	Prozentualer Anteil unzufriedener Personen ³⁶
T_L	$^{\circ}\text{C}$	Lokale Lufttemperatur
\bar{v}	$[\text{m/s}]$	Mittlere lokale Luftgeschwindigkeit
T_u	$[\%]$	Lokaler Turbulenzgrad
s_v	$[\%]$	Standardabweichung der Luftgeschwindigkeit

Für die Anwendung des Fangerschen Modells ist es erforderlich, daß die sechs Hauptparameter innerhalb folgender Grenzen liegen:

M	46W/m^2 bis 46W/m^2	0,8 met bis 4,0 met
I_{Cl}	$0 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ bis $0,31 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	0 clo bis 2 clo
t_a	10°C bis 30°C	
\bar{t}_r	10°C bis 40°C	
v	0m/s bis 1m/s	
p_a	0 Pa bis 2.700 Ps	

Instationäre thermische Verhältnisse

Das Fangersche Modell ist nur gültig für stationäre Klimaverhältnisse. Temperaturänderungen von $\Delta T < 2 \frac{\text{K}}{h}$ werden als stationär empfunden. Temperatursteigerungen über 2K werden deutlich wahrgenommen. Bleibt die Temperatur auf dem neuen Niveau, kann das Fangersche Modell auf dem neuen Temperaturniveau weiterverwendet werden. Fällt jedoch die Temperatur, so liegt die neu empfundene Temperatur *unterhalb* der tatsächlichen neuen Temperatur, und es dauert etwa 30 Minuten, bis der menschliche Körper sich an das neue, kühlere Temperaturniveau gewöhnt hat und wieder das Fangersche Modell gilt.

Stärkere Temperaturschwankungen, die beispielsweise beim Durchqueren verschiedener Klimazonen in Bahnhöfen sowie Ein- und Aussteigen aus Zügen entstehen, können mit dem Fangerschen Modell nicht hinreichend genau abgebildet werden. Außerdem fehlen Untersuchungen zu Langzeitbewertungen mit mehrmonatigen Gewöhnungsphasen und bestimmte, eventuell sogar dynamische raumklimatische Muster. Fanger gibt allerdings qualitative Bemerkungen für die Beurteilung des thermischen Komforts beim Durchschreiten verschiedener Raumklimata: Erfolgt der Wechsel aus einem neutralen in ein extrem warmes oder kaltes Klima, so reagiert der Körper sehr stark auf die Veränderung. Erfolgt der Wechsel in die umgekehrte Richtung, gewöhnt sich der Körper schneller an die thermisch neutrale Umgebung und empfindet sofort ein Gefühl der Behaglichkeit. Die Anpassung findet also schneller statt bei einem Wechsel von Diskomfort zu Komfort als umgekehrt.

³⁶aufgrund von Zegerscheinungen

Richter [89] unterscheidet in seiner Betrachtung Temperaturzyklen, das heißt wiederkehrende thermische Zustände, sowie Temperaturdrifts bzw. -gefälle, also Änderungen ohne Rückkehr zur Ausgangssituation. Außerdem spielt es eine Rolle, ob es ein kontinuierliches Gefälle gibt, oder sich das Klima sprunghaft ändert.

Einen ungleich stärkeren Effekt auf das thermische Wohlbefinden haben plötzliche Sprünge der Luftfeuchtigkeit. Sinkt die Luftfeuchte in der Umgebung, so verdampft die Feuchte aus der Kleidung des Menschen und entzieht dadurch der Haut Wärme, wodurch ein Gefühl des Frierens entsteht. Steigt jedoch die Luftfeuchte, dann kondensiert Wasser auf der Haut, und der Mensch hat das Gefühl zu schwitzen.

Besonders stark tritt dieser Effekt auf, wenn Personen im Winter mit Straßenbekleidung von außen kommend Innenräume betreten. Da die Außenluft sehr feucht ist, ist auch die Kleidung beim Eintreten noch feucht. Es dauert einige Zeit, bis das Wasser verdunstet ist. Dieser Effekt kühlt den Körper, und die betreffende Person merkt nicht, daß sie eigentlich viel zu warm für das Innenraumklima bekleidet ist. Ist das Wasser aus der Kleidung verdampft, so tritt plötzlich ein Gefühl der Überhitzung und des Schwitzens auf. Hier findet also eine zeitliche Verschiebung in der Wahrnehmung des Innenraumklimas statt. In der Gegenrichtung existiert dieser Effekt auch: Beim Verlassen eines Innenraums nach draußen kondensiert Wasser in der Kleidung und führt dem Menschen Wärme zu. Personen, die nicht warm genug gekleidet sind, fühlen das erst einige Zeit nach Verlassen des Gebäudes.

Kritisch wird dieses Thema erst, wenn in ein und demselben Raum Personen über Stunden beschäftigt sind und Laufkundschaft von außen haben. Diese Situation gibt es auch in Bahnhöfen mit ihren Geschäften und Informationsschaltern. Hier empfiehlt Fanger eine niedrige Luftfeuchte auch im Innenraum.

Modellkritik und Weiterentwicklungen

Der Hauptkritikpunkt an dem Fangerschen Modell besteht darin, daß dieses nur ein globales thermisches Behaglichkeitskriterium aus dem Durchschnitt der Gesamtbilanz betrachtet und keine lokalen Temperaturdifferenzen berücksichtigt.

Ein weiterer Kritikpunkt liegt in der fehlenden Berücksichtigung der mittleren Außentemperatur für die Ermittlung der idealen Innenraumtemperatur. Humphrey und Nicol, zitiert in [104], messen die neutral empfundene Temperatur als eine Funktion der Außenlufttemperatur:

$$T_{neutral} = 11,9^{\circ}\text{C} + 0,534 \cdot T_{aussen}$$

Die Außentemperatur geht in diese Gleichung nicht mit allen kurzzeitig auftretenden Extremwerten ein, sondern als *gleitender Durchschnitt*.

Runa Tabea Hellwig[99] kritisiert unter anderem, daß das Fanger-Modell

- nur für mechanisch belüftete, klimatisierte Gebäude gilt, nicht für frei belüftete Räume
- der Erwartungshaltung der Nutzer keinen ausreichenden Stellenwert einräumt

Das Behaglichkeitsmodell von P. O. Fanger wurde in neuerer Zeit um sogenannte *adaptive* Komfortmodelle erweitert [95]. Diese Modelle berücksichtigen die Erwartungshaltung von Gebäudenutzern, indem die Vortagesmittelwerte der Temperatur in die Modellierung der Behaglichkeitswerte PMV und PDD des Nachfolgetages mit einfließen. Beispielsweise ist der Dämmwert der (in Innenräumen) getragenen Kleidung abhängig von der durchschnittlichen Außentemperatur der letzten Tage und nicht nur des aktuellen Momentes. Hellwig führt daher unter anderem einen *Erwartungsfaktor* („Expectancy Factor“) ein. Weitere im Fangerschen Modell nicht betrachtete Größen sind die Gebäudeart und -funktion und die Art und Dichte der Belegung durch Menschen.

Komfort und Zeit

Der Eindruck von Komfort oder Behaglichkeit hängt stark von der Dauer ab, der ein Mensch einer bestimmten Umgebung ausgesetzt ist. Bei bestimmten Zuständen mag sich Komfort erst nach einiger Zeit aufgrund von Gewöhnung einstellen, andere Situationen sind zunächst behaglich, werden aber mit der Zeit unkomfortabel. Krist schreibt in [10], daß nicht der physikalische Reiz, sondern dessen Empfinden für das Maß an Komfort verantwortlich ist. Nach dem Weber-Fechner'schen Gesetz und dem Potenzgesetz der Psychophysik ist der Zusammenhang zwischen Reiz und Empfindung logarithmisch, das heißt der absolute Zuwachs eines Signals muß immer stärker werden, damit die menschlichen Sinnesorgane darauf reagieren.

3.6.5 Personenbewegung

Personenbewegungen spielen bei der Funktionalität und dem Energieverbrauch von Bahnhöfen sowie dem Komfortempfinden der Nutzer eine wichtige Rolle. Vorbereitend auf die in Kapitel 7 beschriebene Modellierung werden in diesem Abschnitt Forschungsarbeiten vorgestellt, die sich mit der numerischen Modellierung von Personenbewegungen im öffentlichen Raum befassen. Untersucht wird sowohl die Bewegung zu Fuß als auch im Automobil. Die Zielsetzungen der Simulationen sind unterschiedlich und reichen von Optimierungen im Straßenverkehr über Ampelschaltungen, über die Dimensionierung städtebaulicher Parameter wie Straßenschluchten, Zebrastreifen und Unterführungen, die Planung von Fluchtwegen im Hochbau bis hin zur Simulation automatisch gesteuerter Personen in Computerspielen. Die verschiedenen Simulationen laufen auf unterschiedlichen Skalen ab:

Skalenniveau	Anzahl Personen	Modellvorbild
Makroskopisch	Einige 10.000	Fluide, Partikel
Mikroskopisch	10 bis 1000	Individuelle Entscheidungen

Einige Modelle sollen in Echtzeit simulieren, bei anderen spielt die Simulationszeit keine kritische Rolle. Wand, Kearney, Cremer und Willemsen untersuchen in [125] das Verhalten von Autofahrern an Straßenkreuzungen mit Ampelsteuerung. Das geometrische Modell besitzt einen annähernd stetigen Definitionsraum, das heißt, die Autos können beliebige Positionen und Fahrtrichtungen annehmen und bewegen sich nicht auf schachbrettartigen Feldern. Kernthema ist das Vermeiden

von Kollisionen unter Berücksichtigung des Bremsweges. Die simulierten Autofahrer wollen möglichst zügig die Kreuzung passieren und dabei wenig bremsen oder beschleunigen. Die Autoren kommen dabei zu dem Ergebnis, daß sich Autofahrer bei der Wahl ihrer Route *führende* Autos suchen, welche das gleiche Ziel in derselben Richtung haben und denen sie folgen. Ein weiteres Ergebnis der Arbeit ist, daß die Distanz und der Öffnungswinkel des Sichtfeldes eines Autofahrers von der Fahrtgeschwindigkeit abhängen: Je schneller ein Auto fährt, desto weiter entfernte Objekte nimmt der Fahrer wahr, aber umso geringer ist die seitliche Wahrnehmung und Breite des Sichtfeldes. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Simulation von Abbiegefahrten über Kreuzungen ist das mathematische Aufspüren von Lücken im fahrenden Gegenverkehr, die groß genug sind, um unbeschadet mit dem eigenen Fahrzeug hindurchzufahren.

Loscos, Marchal und Meyer untersuchen in [126] das intuitive Bewegungsverhalten von Menschen in dicht bevölkerten städtischen Umgebungen. Auch hier spielt das Vermeiden von Kollisionen eine zentrale Rolle. Damit die simulierten Personen aus Angst vor Kollisionen nicht an Ort und Stelle verharren oder hin- und herpendeln, bekommen sie Ziele vorgegeben, denen sie entgegensteuern. Abweichen von der auf das jeweilige Ziel gerichtete Bewegungsrichtung sowie Beschleunigen und Bremsen erzeugt *Kosten*, die die Simulationsobjekte so weit wie möglich zu vermeiden suchen. Das Ziel der Untersuchung ist die Messung der Personendichte in bestimmten städtischen Räumen. Daher haben die simulierten Personen auch kein eindeutiges Ziel, sondern irren planlos in der Stadt umher. Das geometrische Modell ist diskretisiert in Felder, die nicht größer sind als der Platzbedarf einer Person. Da bis zu 10.000 Personen in Echtzeit simuliert werden sollen, muß der Simulationsalgorithmus schlank und effizient sein. Sämtliche Personen besitzen eigene psychologische Eigenschaften und treffen eigene Bewegungsentscheidungen. Besonders wichtig ist die Tatsache, daß weniger als die Hälfte aller Menschen alleine laufen, die meisten Menschen laufen als Paar oder in Kleingruppen, welche eine spezielle Bewegungsdynamik haben. Wie in dem vorhergehend diskutierten Modell wird auch hier die These aufgestellt, daß Menschen in chaotischen Massenbewegungen der Person, die vor ihnen in dieselbe Richtung läuft, hinterherlaufen. Dies wird durch ein virtuelles Kraftfeld nachgestellt, in dem Personen nach dem Verlassen eines Feldes dieses mit ihrer Bewegungsrichtung *markieren*, welche nachfolgende Personen eine Zeit lang adaptieren. Menschen in überfüllten städtischen Umgebungen meiden Bereiche zu hoher Personendichte. Können sie ihre Bewegung in Richtug Ziel aufgrund der drohenden Kollision mit einer anderen Person oder einem Gebäude nicht fortsetzen, müssen sie ausweichen. Möglich sind Richtungsänderungen (Überholvorgänge) in Kombination mit Brems- oder Beschleunigungsbewegungen. Die Art der Reaktion hängt von der eigenen Geschwindigkeit ab und von der Richtung, aus der das Hindernis kommt. Hindernisse können entgegen kommen, sie können quer zur eigenen Richtung den Weg kreuzen, sie können sich langsamer aber in dieselbe Richtung bewegen oder bewegungslos sein.

Speziell mit dem Verhalten von Fußgängern zur Vermeidung von Kollisionen beschäftigt sich Franck Feurtey[127] in seiner Master Thesis aus dem Jahr 2000. Er vergleicht zunächst den makroskopischen und mikroskopischen Ansatz. Ein gutes Modell zeichnet sich seinen Ergebnissen zufolge dadurch aus, daß die Gehgeschwindigkeit der Menschen mit der Personendichte abnimmt und folgende Bewegungsformen möglich sind:

- die Freiheit, eine favorisierte Geschwindigkeit zu wählen oder zu überholen
- die Möglichkeit, einen Personenstrom zu kreuzen

- die Möglichkeit, gegen einen Personenstrom anzulaufen
- die Fähigkeit, kollisionsfrei zu manövrieren

Eine Schlüsselrolle erhält daher das *Nachgeben*, bzw. das Ausüben von Höflichkeit, welches in den makroskopischen Ansätzen unter dem Vorbild der Fluide und Teilchenbewegungen nicht realisiert werden kann. Bei Modellen, die sich an Verhaltensweisen von Vogel- oder Fischeschwärmen orientieren, wird dagegen das Sozialverhalten überbewertet und das einzelne Individuum nicht stark genug berücksichtigt. Die Modellierung von Höflichkeit ist nur in mikroskopischen Modellen möglich, in denen für jede einzelne Person Entscheidungen auf Basis physikalischer und psychosozialer Zustände getroffen werden.

Das höfliche Nachgeben bei Kollisionsgefahr mit anderen Personen kann folgende Ausprägung haben:

- bremsen oder stehenbleiben
- Richtung ändern und ausweichen
- in seltenen Fällen beschleunigen und Platz machen

Interaktionen der Höflichkeit zwischen zwei Personen finden nur bei bestimmten Abständen untereinander statt, die von der Personendichte und der relativen Geschwindigkeit abhängen:

Dichte	Wahrnehmungsradius ³⁷	Ausweichreaktion
sehr eng	1,5m	Schritt zur Seite
gering	2,1m	Richtungsänderung
sehr gering	15-30m	Richtungsänderung

Die Art und Weise, wie Personen auf Hindernisse durch Objekte oder andere Personen reagieren, hängt vom Abstand zu den Hindernissen und der Dichte ab. Bei sehr großen Distanzen planen die gehenden Personen eine Route, die keine Kollisionsgefahr birgt. Bei sehr kurzen Distanzen kommen Reflexe und intuitive Reaktionen zum Tragen. In sehr kritischen Situationen größter Dichte kann es vorkommen, daß Personen ihre Bewegung gar nicht mehr selbst bestimmen können, sondern sich dem Druck der Menge beugen müssen.

Die möglichen Gehgeschwindigkeiten macht Feurtey davon abhängig, daß beim Laufen immer genau ein Fuß Bodenkontakt hat. Das ist bei Geschwindigkeiten zwischen $0,7m/s$ und $2,0m/s$ möglich. Bei höheren Geschwindigkeiten befinden sich zwischenzeitlich beide Füße in der Luft, was man mit Rennen bezeichnet und in der Regel im öffentlichen Raum nicht vorkommt. Bei Bewegungen unter $0,7m/s$ müßten entweder die Schritte sehr klein sein oder zwischenzeitlich beide Füße auf dem Boden stehen, was umständlich wäre und komisch aussehen würde, weshalb in der Regel niemand so langsam geht. Stattdessen würden Fußgänger kurzfristig ganz anhalten und danach ihre Bewegung mit über $0,7m/s$ fortsetzen. Als durchschnittliche Gehgeschwindigkeit nimmt Feurtey $1,5m/s$ an.

Zwei weitere Stellgrößen im Bewegungsmodell sind die Intimitätsdurchmesser und die Tiefe der Vorausschau der Personen. Der Intimitätsdurchmesser einer Person beschreibt den Kreis um seinen Körper, der auf keinen Fall von einem anderen Menschen betreten werden darf, da es sonst zu einer reflexartigen Vollbremsung und zum Zurückweichen der Person kommen würde. Bei

einem Intimitätsdurchmesser von unter $0,8m$ kann es zu Kollisionen kommen, bei zu großen Intimitätsradien machen die Personen unnatürlich große Umwege. Nach Feurtey liegt der optimale Intimitätsdurchmesser bei $0,85m$. In einer detaillierten Modellierung würde der Intimitätsdurchmesser davon abhängen, in welchem sozialen Verhältnis zwei Personen zueinander stehen. Ehepaare und ihre Kinder würden einen sehr kleinen Abstand von unter $0,5m$ halten, während Freunde, Bekannte und Kollegen sowie Fremde in der Öffentlichkeit höhere Abstände einhalten. Der Intimitätsradius ist obendrein von der kulturellen Herkunft einer Person abhängig.

Die Tiefe der Vorausschau mißt die Anzahl der Zeitschritte³⁸, für die eine Person seine eigene Bewegung und die der anderen Menschen im sichtbaren Umfeld in die Zukunft extrapoliert, um optimale Wege zu finden. Bei einer sehr geringen Vorausschau (unter 4 Stufen bei einer Schrittweite von $\delta t = 0,1s$ pro Iteration) wechseln die Personen ständig ihre Fährte und bewegen sich sehr un stetig. Bei sehr großen Vorausschautiefen planen die Personen ihre Route unnatürlich präzise, und die Rechenzeit für die Simulation steigt. Als günstige Tiefe hat der Autor $n=20$ ermittelt, was einer Vorschau von 20 Sekunden entspricht bzw. $3m$ bei durchschnittlicher Geschwindigkeit. Die Bewertung der möglichen Wege erfolgt nach folgenden Prinzipien:

- Zielerreichung
- Hindernisse vermeiden
- Andere Personen vermeiden

Die Berechnung kollisionsfreier Bewegungen in der Ebene geschieht in zwei Schritten:

1. Aufspüren von Hindernissen und Personen
2. Änderung der Bewegung zur Vermeidung von Kollisionen

Das Aufspüren möglicher Kollisionen in der Zukunft geschieht mittels geometrischer Betrachtungen in einem dreidimensionalen (x,y,t) -Raum. (x,y) beschreibt die zweidimensionale Ebene, in der sich die Personen bewegen. Die dritte Dimension repräsentiert die Zeitachse. Die geometrischen Bewegungsmöglichkeiten in der Ebene im Verlauf der Zeit entsprechen auf dem Kopf stehenden Kegel, wobei die Spitze den aktuellen Standort repräsentiert und die horizontale Scheibe darüber die erreichbaren Orte bei einer bestimmten Geschwindigkeit v_M . Je weiter die Vorausschau in der Zukunft liegt, desto größer sind die Kreisflächen der erreichbaren Orte. Da sich aber die Scheiben der in der Zukunft erreichbaren Orte mehrerer Personen überlappen können oder feste Hindernisse wie Wände darin auftauchen können, werden diese Flächen gesperrt. Übrig bleiben nur solche Orte, die garantiert von keiner anderen Person oder einem Hindernis im betrachteten Zeitraum besetzt werden können.

Tauchen Hindernisse oder andere Personen auf der Scheibe der erreichbaren Orte auf, so hat die betreffende Person folgende Möglichkeiten, darauf zu reagieren:

Beibehaltung	Anpassung	Zielerreichung
Bewegungsrichtung	Bremsen, warten	verspätete Ankunft
Geschwindigkeit	Umwege laufen	verspätete Ankunft
Zeit	Beschleunigen und Umwege laufen	pünktliche Ankunft

³⁸Iterationen

Die Entscheidung, welche Möglichkeit eine Person zur Vermeidung von Kollisionen auswählt, hängt neben der zeitlichen und örtlichen Enge von den *Kosten* ab, die eine Veränderung der Bewegung nach sich ziehen. Je nach Personentyp können die Kosten mit verschiedenen Faktoren gewichtet werden. Kosten werden verursacht durch:

1. Von dem eigentlichen Ziel wegbewegen
2. Die Richtung ändern
3. Beschleunigen
4. Bremsen

Feurtey hat bei seinen Untersuchungen ebenfalls festgestellt, daß Fußgänger dazu neigen, einen vorhergehenden Passanten mit demselben Ziel und ähnlicher Geschwindigkeit zu suchen, in dessen Windschatten sie laufen. Allerdings erfolgt das Nachlaufen nicht auf derselben Linie, sondern seitlich versetzt, so daß der Nachlaufende die Möglichkeit hat, über die Schulter des Vorgängers Einblick in dessen Sichtfeld zu erlangen und nicht gegen den Hinterkopf zu blicken. Analog findet bei nebeneinanderlaufenden Fremden eine Verschiebung in Bewegungsrichtung statt. Gruppen fremder Personen besetzen also beim Laufen Positionen relativ zueinander, die gleichfarbigen Feldern auf dem Schachbrett entsprechen.

Eine weitere Beobachtung des Autors betrifft die Umgebungstemperatur beim Gehen. Demnach liegt die optimale Untergrenze bei 13°C. Erst bei höheren Temperaturen macht die Bewegung den Personen Spaß. Die in den Abschnitten 3.3.1 und 3.6.4 genannten Temperaturgrenzen für Gebäudeinnenräume liegen deutlich höher, was daran liegt, daß gehende Menschen einen höheren Aktivitätsgrad und Stoffwechsel haben als Personen in Büroräumen und Wohngebäuden. Nach [35] spielt beim Bahnhausmodell aber der gleitende Mittelwert der Außentemperatur eine zentrale Rolle zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit beim Gehen.

Helbing, Farkas und Vicsek untersuchen in [128] das Bewegungsverhalten von Personen unter Panik, wie beispielsweise in Fußballstadien oder brennenden Gebäuden. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf den Rückstaus für sogenannte Nadelöhre in Gebäuden. Da im Panikfall so gut wie alle Personen in dieselbe Richtung rennen, um das Gebäude zu verlassen, und das Höflichkeitsverhalten anders ist als im Normalbetrieb eines Gebäudes, eignen sich die Erkenntnisse nur schlecht zur Modellierung der Bewegung von Reisenden in einem Bahnhof.

Auswertung

Die zitierten Untersuchungen geben hilfreiche Anhaltspunkte zur Modellierung der Reisendenbewegungen in Bahnhöfen, allerdings treffen die modellierten Parameter und Systemdetails nicht genügend genau die Anforderungen für das in dieser Arbeit erforderliche Modell.

Auf der einen Seite werden Aspekte berücksichtigt, die im Bahnhausmodell unberücksichtigt bleiben. Dazu gehört die Form des Menschen, die in einigen Formen nicht als Kreis, sondern als Ellipse angenommen wird. Ein stehender Mensch ist breiter als tief. Da allerdings beim Laufen die Füße weiter nach vorne und hinten die Mittelachse des Körpers verlassen, als die Schultern breit sind, wird in dieser Arbeit vereinfachend eine Kreisform angenommen. Des Weiteres bleiben die Überlegungen zu Autos an ampelgesteuerten Kreuzungen unberücksichtigt, genauso wie

die Aspekte des Fluchtverhaltens bei Panik. Das versetzte Laufen wäre zwar realistisch für einige Reisende, wird aber in dem Modell in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Ebenso wenig wird beim Bestimmen des Intimitätsradius die kulturelle Herkunft oder der sozialen Status von zwei Personen in nächster Nähe gehender Personen einbezogen.

Auf der anderen Seite ist die Modellierung in vielen Aspekten zu ungenau:

Die Diskretisierung in Felder wie bei [126] ist für Situationen an baulichen Nadelöhren wie automatische Schiebetüren zu unscharf. Komplettspernung der „Scheiben erreichbarer Positionen“ aufgrund von anderen Personen ist sehr restriktiv. Schließlich besteht die Möglichkeit, daß die vermeintlich besetzten Felder in der Zukunft nicht mehr besetzt sein werden, oder daß sich die Dominanz des Herannahenden durchsetzt und andere Personen weichen. Insofern ist hier eine *stochastische Sperrung* vorzusehen.

Ein wichtiger Aspekt ist das zeitliche Ziel und die damit verbundene Hektik, die in den zitierten Modellen³⁹ keine Rolle spielen.

Eine Verknüpfung der Bewegungen mit Eindrücken des thermischen Komforts und daraus resultierender Bewegungsentscheidungen, z.B. Vermeidung von Luftzug durch Laufen im Windschatten anderer Personen oder Einbauten, ist in den Modellen nicht vorgesehen, wäre aber für ein Bahnmodell durchaus wichtig. Dazu gehört auch die Möglichkeit, daß sich modellierte Personen länger an bestimmten Orten aufhalten und sich nicht bewegen, sondern Jacken und Mäntel ablegen, um sich dem Raumklima anzupassen.

Es fehlen außerdem die Modellierung automatischer Türen, Drehtüren, Treppen und Fahrstühlen, sowie die Verknüpfungen von Personen mit Gepäck, Rollstühlen und Fahrrädern.

Die Personen in den besprochenen Modellen kennen nur feste oder zufällige (Etappen-)ziele. In Bahnhöfen verändern Reisende ihre Bewegung in Reaktion auf Durchsagen und Anzeigen. Außerdem entscheiden sie sich häufig kurzfristig für eine bestimmte Einstiegstür von Zügen in Abhängigkeit der Menschenmengen, die aus den Türen aussteigen und solchen, die sich bereits zum Einsteigen anstellen. Die Wahl der Einstiegstür hängt außerdem vom tatsächlichen Halt des Zuges ab, der ebenfalls variieren kann.

3.7 Software

3.7.1 Thermische und strömungsmechanische Simulation

Im Rahmen dieser Arbeit sind verschiedene Softwarepakete zum Einsatz gekommen. Die thermodynamischen und strömungsmechanischen Simulationen sind mit Hilfe der Software Fluent erstellt worden⁴⁰, die dynamischen Gebäudesimulationen für Klima und Komfort mit der Software DK-Solar⁴¹. Eine visuelle Modellierungsumgebung für DK-Solar sowie eigene Simulationsmodelle

³⁹abgesehen vom Panik-Fluchtmodell aus[128]

⁴⁰Siehe Abschnitt 3.7.3

⁴¹Siehe Abschnitt 3.7.2

zur Messung von Funktionalität und Komfort in Bahnhöfen habe ich mit Borland Delphi⁴² entwickelt und compiliert. Die Arbeitsblätter und Werkzeuge für das Sensitivitätsmodell von Vester und dessen Einsatz im Seminar „Wohlfühlbahnhof“ an der TU Darmstadt sind mit Excel VBA und Delphi geschrieben worden.

Die beiden Simulationenmethoden Strömungssimulationen und dynamische Gebäudesimulation ergänzen einander, wie in den Abbildungen 3.29 bis 3.31 deutlich wird. Die Strömungssimulationen wurden mit Ansys Fluent erstellt, einem 'reinen Physikprogramm', mit dem man thermodynamische Prozesse in beliebigen Geometrien simulieren kann, also keine gebäudespezifischen Datenbibliotheken oder Simulationalgorithmen bereitstellt. Die dynamischen Gebäudesimulationen wurden mit DK-Solar erstellt, einem Programm, das für den Einsatz im Gebäudebereich entwickelt wurde, dessen physikalische Modelle zwar geometrisch gröber sind als bei Fluent, dafür aber auch psychologische und finanzielle Größen verarbeitet und eine reichhaltige Datenbank an Parametern aus der Gebäudetechnik und Bauphysik zur Verfügung stellt.

	1. Energiebilanzsimulation Kybernetische Herangehensweise	2. Strömungssimulation Computational Fluid Dynamics
Entwickler		
Modellaufbau	<ul style="list-style-type: none"> • Klimazonen • Wandaufbauten • Technische Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohlraumgeometrie • Räumliches Gitternetz • Randbedingungen
Variablen	<ul style="list-style-type: none"> • Grobe Geometrie • Materialkennzahlen • Leistung Technische Anlagen • Nutzerverhalten • Energieeinsatz • Temperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Detaillierte Geometrie • Oberflächen, Volumen • Vernetzung der Strömungsgebiete • Material, thermische Eigenschaften • Temperatur, Energiestrom, Strahlung • Massenstrom, Geschwindigkeiten

Abbildung 3.29: Zwei sich ergänzende Simulationsverfahren

3.7.2 DK-Solar

Die Software DK-Solar entstammt dem Hause „Delzer Kybernetik“, einem mittelständischen Unternehmen in Lörrach im Südwesten Deutschlands. Es handelt sich um ein Werkzeug zur dynamischen Gebäudesimulation, welches in seinem gesamthaften, kybernetischen Ansatz physikalische Größen mit Komfortparametern und wirtschaftlichen bzw. finanziellen Aspekten kombiniert.

Jahressimulationen mit einem dynamischen Simulationswerkzeug wie DK-Solar eignen sich hervorragend, um Startwerte für die zeitlich sehr begrenzten Strömungssimulationen zu berechnen. Richter [89] empfiehlt eine Einschwingphase mittels thermischer Gebäudesimulation, in der keine detaillierte Berechnung der Raumluftrömungen stattfindet.

⁴²gehört heute zu Embarcadero Codegear

		
Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Klimadaten • Zeit • Material / Wandaufbauten 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Druck • Massenstrom
Berechnung	<ul style="list-style-type: none"> • Energieerhaltungssatz <ul style="list-style-type: none"> • Wärmetransmission • elektrische Energie • Lichtabsorption • Ausgleich Energiegefälle • Differentialgleichungen • Abwärme von Menschen • Solare Gewinne 	<ul style="list-style-type: none"> • Energieerhaltungssatz <ul style="list-style-type: none"> • Wärmetransmission • Konvektion • Strahlungsaustausch • Massenerhaltungssatz • Momenterhaltungssatz • Turbulenzmodelle • Wandnahe Strömung • Auftrieb • Reibungswärme • Differentialgleichungen
Zeitfenster	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Tag • 1 Woche • 1 Jahr 	<ul style="list-style-type: none"> • Stetige Strömung: 0 Sekunden • Unstetige Strömung: bis 1 Minute

Abbildung 3.30: Vergleich der Leistungsschwerpunkte beider Systeme

3.7.3 Ansys Fluent

Das Programm Fluent berechnet Strömungen von Fluiden in Modellen, die aus virtuellen Gitternetzen und physikalischen Randbedingungen bestehen. Die Schwerpunkte der Modellierung bestehen in der Erzeugung und effizienten Vernetzung dreidimensionaler Geometrien, dem Setzen sinnvoller physikalischer Randbedingungen, der Auswahl für den entsprechenden Maßstab geeigneter Algorithmen sowie das „Post-Processing“, die Darstellung der simulierten Strömung.



		
Zielgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Energieeinsatz • Verluste nach außen • Thermische Zustandsgrößen • Bewertung des Komforts • Finanzieller Aufwand / Nutzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Energieströme • Massenströme • Geschwindigkeiten • Turbulenzgrade • Energieeinsatz
Ausgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Graphen • Tortendiagramme • Tabellen (Werte) 	<ul style="list-style-type: none"> • farbige 3D Geometrie <ul style="list-style-type: none"> • Konturen / Flächen • Pfade / Pfeile • Animationen / Standbilder • Einzelwerte • Graphen

Abbildung 3.31: Zielgrößen und Ausgabeformate

Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse

Bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit und Vertrauenswürdigkeit der numerischen Strömungs- und Strahlungssimulationen der Software Fluent hilft der Vergleich zwischen Messergebnissen und Simulationen, den Olaf Zeidler in seiner Arbeit über Fensterlüftung in Büroräumen und daraus resultierenden vertikalen Temperaturgradienten anstellt [23]. Eigene Vergleichsmessungen in einem ähnlichen Umfang wie in der hier zitierten Arbeit habe ich vor allem aus Kostengründen und in Ermangelung eines professionell ausgestatteten Versuchslabors nicht durchführen können. Allerdings konnte ich mit einigen Handgeräten Vergleichsmessungen im Darmstädter Hauptbahnhof vornehmen.

Die Strömungsverläufe in der Simulation und den Messungen von Olaf Zeidler sind qualitativ übereinstimmend. Allerdings sind die Geschwindigkeitsangaben in der Simulation höher. Das liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit daran, daß die Simulation Maximalwerte je Iterationsschritt ausgibt, die Messung jedoch Durchschnittswerte der hohen Schwankungen von Geschwindigkeiten. Außerdem werden nur örtlich begrenzte Messungen vorgenommen, jedoch flächig simuliert.

Die größte Abweichung entsteht bei der Oberflächentemperatur der Gegenstände im Strömungsgebiet, wenn als Wärmequelle ein Wärmestrom definiert wird. Die numerischen Wärmequellen erzeugen dann eine Oberflächentemperatur von 65°C, in Wahrheit liegt sie jedoch nur bei 36°C. Grund dafür könnte die zu grobe Zellaufteilung sein. Für die Innenwände liefern die Wärmequellentypen *Wärmestrom* und *Temperatur* gleiche Ergebnisse. Bei Berechnung mit *Full Bouyancy Effect* wird der Auftrieb sehr stark angenommen, es stellt sich keine Luftschichtung mehr ein. Die eigentliche Schwäche des Programms ist die Turbulenz: Die niedrigen Raumluftgeschwindigkeiten führen rechenstechnisch zu laminaren Strömungen. Im Bereich der Fenster treten höhere Geschwindigkeiten auf. Es wird jedoch keine Turbulenz entfacht. Durch die fehlende Turbulenz kommt es nur zu einem sehr schwachen Geschwindigkeitsabbau⁴³.

Das Fazit der zitierten Arbeit ist: Qualitative Aussagen aus der Strömungssimulation sind möglich, quantitativ jedoch problematisch.

3.7.4 Auswertung

Die beiden vorgestellten Software-Produkte sind in der Lage, basierend auf Funktions- und Datenmodellen das dynamische Verhalten realer Systeme in vereinfachter Form möglichst realitätsnah nachzuempfinden. Simulationen können vergleichende Berechnungen zu Vorgängen, die tatsächlich in der Vergangenheit stattgefunden haben, anstellen, oder simultane Berechnungen in der Gegenwart durchführen oder die Zukunft prognostizieren. Die Vergleichssimulation geschieht zu meist zur Verifikation der Modellannahmen, Simultansimulation zur Steuerung von Prozessen, in denen Fehler auftreten können. Prognostizierende Simulationen können einerseits dazu dienen, den zukünftigen Zustand eines bekannten Systems zu extrapolieren, andererseits können mit Hilfe verschiedener Varianten alternative Zukunftsszenarien qualitativ verglichen und das System an sich optimiert werden.

⁴³Dieselbe Diskrepanz habe ich bei meinen eigenen Messungen und Simulationen für den Darmstädter Hbf erfahren: In der Simulation strömt Kaltluft fast laminar durch die Halle, während der gemessene Luftstrom schon nach wenigen Metern deutlich an Geschwindigkeit verliert

Die Vorteile von Simulationsprogrammen liegen darin, daß ausgehend von einem Modell sehr schnell unterschiedliche Varianten gebildet und getestet werden können. Die Kosten und die Analysegeschwindigkeit sind also wesentlich besser zu bewerten als bei physischen Modellen, analytischen Lösungen oder gar der Errichtung von Gebäuden ohne vorherige Analysen, die spätere Korrekturen nach sich ziehen.

Die Nachteile bestehen darin, daß bei der Berechnung vereinfachter Modelle immer Zweifel bleiben, ob die Ergebnisse belastbar und glaubhaft sind. Grund für die mangelnde Belastbarkeit können Fehler in der mathematischen Modellierung oder Fehler im Datenmodell sein. Diese können beispielsweise dadurch hervorgerufen werden, daß der Modellierer schon ein klares Bild von dem Ergebnis vor Augen hat und seine Daten und Formeln so lange variiert, bis das gewünschte Ergebnis am Schluß herauskommt. Daher ist es grundsätzlich sinnvoll, Messungen zur Verifikation der Simulationsergebnisse vorzunehmen, zumindest bis das Modell als sicher gilt.

Die beiden in der Arbeit eingesetzten Simulationspakete ergänzen einander. Das Programm DK-Solar erzeugt Simulationen für sehr große Zeitfenster, bis zu einem Jahr. Es werden Aussagen über das Gesamtsystem Gebäude getroffen. Die Ergebnisse dieser Simulationen eignen sich gut als Startwerte für Simulationen mit Fluent. Dort sind die Zeitfenster wesentlich kleiner, in der Größenordnung mehrerer Sekunden, die Genauigkeit der physikalischen Aussagen aber größer.

Da beide Programme nicht für die Simulation von Bahnhöfen entwickelt wurden, im Falle von Fluent noch nicht einmal für die Simulation von Gebäuden, sind bei den Simulationen vereinfachende Annahmen zu treffen. An erster Stelle sind hier die *Personenbewegungen* zu nennen. Fluent ist mit vertretbarem Aufwand nur in der Lage, leere Gebäude zu simulieren. Bei DK-Solar können zumindest wöchentlich wiederkehrende Nutzerprofile eingegeben werden. Menschen mit ihren komplexen Eigenschaften lassen sich nur schwer modellhaft darstellen:

Physische Wirkung	Funktionelle Größe
Luftverdrängung	Empfänger von Klima
Wärmestrahlung	Wunsch nach Funktionserfüllung

In Kombination mit dem in Kapitel 7 beschriebenen Funktions- und Komfortmodell „Personenbewegung“ und den in Kapitel 4 dargestellten quantitativen Modellen als Grundlage zur Bestimmung der Randbedingungen für die Simulationen bilden die beiden in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahren Strömungs- und thermische Simulation jedoch einen unersätzlichen Baustein in der Optimierung von Energieeffizienz und thermischem Komfort von Bahnhöfen mit Hilfe numerischer Werkzeuge.

4 Statistische Analyse thermodynamischer Kenngrößen in Bahnhöfen

4.1 Motivation

Wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, verfügen Personenbahnhöfe über verschiedene klimatische Zustände, die räumlich und zeitlich variieren. Sowohl für Reisende, die sich durch verschiedene Gebäudezonen bewegen, als auch für Angestellte, die verschiedenen von der Tageszeit abhängigen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind, ändern sich während des Aufenthalts in Bahnhöfen die Eindrücke thermischen Komforts. Da nicht nur die absoluten Werte der thermischen Rahmenbedingungen, sondern auch deren Veränderung (Dis-) Komfortempfindungen hervorrufen, und die Veränderungen der thermischen Zustände nur bedingt durch Änderungen der Kleidung und des Aktivitätsgrades kompensiert werden können, sind die räumliche und zeitliche Verteilung von thermischen Zuständen in Bahnhöfen Gegenstand der Optimierung und werden in diesem Abschnitt analysiert.

Sowohl die räumliche als auch die zeitliche Veränderung von thermischen Zuständen basieren auf der räumlichen Anordnung von Gebäudezonen und der Art der Grenzen zwischen ihnen. Somit wird der Grundstein für die thermische Optimierung eines Bahnhofs bereits bei der Planung und Zonierung eines Bahnhofs gelegt. Abschnitt 5.2 zeigt allerdings, daß bestimmte thermische Gebäudezonen erst dann optimal funktionieren, wenn sich ihr Öffnungsgrad zu den benachbarten Zonen dynamisch in Abhängigkeit der thermischen und funktionalen Randbedingungen ändert.

Eine statische Betriebsweise würde bei einer Auslegung nach extremen oder durchschnittlichen Randbedingungen entweder einen zu geringen Öffnungsgrad bei normalen Außentemperaturen verursachen oder zu extremen Innentemperaturen bei extremen Außentemperaturen führen.

Die in diesem Abschnitt beschriebene Datenanalyse soll folgende Fragen klären:

- Wie häufig treten während der Betriebszeit in bestimmten Gebäudezonen extreme thermische Zustände auf, und wie häufig sind gemäßigte thermische Zustände?
- Wie stark ist die puffernde Wirkung der einzelnen Zonen von außen nach innen?
 - Räumliche Veränderung
 - Zeitliche Verzögerung
- Wie realistisch sind die
 - Ergebnisse der thermischen Simulation?
 - Annahmen für die Randbedingungen der Strömungssimulation?

Folgende Ziele sollen dabei erreicht werden:

- Aufgrund der Häufigkeit bestimmter extremer klimatischer Zustände sollen die Zonen im Bahnhof identifiziert werden, die eine besondere Ausführung wie z.B. dynamische Veränderung der Raumbegrenzungen bedürfen
- Informationen über den Einfluß der geometrischen Anordnung der Zonen zwecks Optimierung des Planungsprozesses und Dimensionierung der Raumbegrenzungen
- Entwicklung eines Prognosemodells, mit dem langfristige Temperaturhäufigkeiten und kurzfristige Schwankungen vorausberechnet werden können. Dadurch könnten dynamische Zonenbegrenzungen in Bahnhöfen optimal geregelt und Nach- bzw. Übersteuerungen vermieden werden
- Vergleich der Summenhäufigkeiten für bestimmte Temperaturintervalle bei Messung und thermischer Simulation¹
- Aussagen darüber, wie wahrscheinlich das tatsächliche Eintreten der angenommenen Randbedingungen für die Strömungssimulation als thermischer Zustand im realen Betrieb ist

Für die räumlichen Zusammenhänge zu bestimmten Zeitpunkten werden einfache lineare Regressionsmodelle eingesetzt. Für die zeitliche Dynamik der Zustände innerhalb einer oder zwischen verschiedenen Gebäudezonen werden ebenfalls auf linearer Regression basierende Zeitreihenanalysen benutzt.

4.2 Zusammenhang zwischen statistischer Analyse und Optimierung der Energieeffizienz

Energieeffizienz bedeutet, mit dem geringstmöglichen Einsatz an Ressourcen einen erwünschten Nutzen zu erzielen, z.B. die Sicherstellung eines angemessenen thermischen Komforts. Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik sind energetische Potentiale stets bestrebt, einander auszugleichen. Nutzbare Energie kann also weder verlustfrei gespeichert noch verlustfrei transportiert werden. Die Optimierung von Energieeffizienz strebt danach, Energie zu nutzen, und dabei nicht mehr Energie als nötig einzusetzen, insbesondere Speicherungs- und Transportverluste zu vermeiden. Dies läßt sich einerseits durch verlustvorbeugende Dämmmaßnahmen bewerkstelligen, vor allem aber durch die präzise nachfrageorientierte Bereitstellung von Energie hinsichtlich Ort und Zeit. Mit anderen Worten: Wenn nutzbare Energie in der exakten Bedarfsmenge zum richtigen Zeitpunkt bereitgestellt und zum richtigen Ort des Verbrauchs geliefert wird, werden die Transportverluste minimiert und Speicherverluste eliminiert. Ein wichtiges Instrument der energetischen Optimierung ist also eine möglichst gute Vorhersage darüber, wann wo wie viel Energie benötigt wird.

4.3 Meßdaten

Stellvertretend für alle anderen Bahnhöfe mittlerer Größe² wird in dieser Arbeit der in Abschnitt 6.1.1 beschriebene Darmstädter Hauptbahnhof untersucht. Für die thermodynamische Datenana-

¹Ein zeitlich synchroner Vergleich der Temperaturverläufe ist nicht sinnvoll, da bei den Messungen die realen Wetterbedingungen in 2005 bzw. 2008 herrschten, während den Simulationen ein Testreferenzjahr zugrundeliegt.

²Kategorie Verkehrsstation 2 und 3, vergleiche Abschnitt 2.2

lyse stehen drei verschiedene, abhängige Messreihen zur Verfügung:

1. Stunden-Zeitreihen der Wetterstation in Darmstadt, bestehend aus Daten bezüglich Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, relativer Luftfeuchte und Globalstrahlung für einen fünf-wöchigen Zeitraum im März/April 2005 sowie das gesamte Jahr 2008³
2. 5-Minuten-Zeitreihen von vier verschiedenen Dataloggern im Hauptbahnhof Darmstadt, bestehend aus Daten bezüglich Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte für denselben fünf-wöchigen Zeitraum im März/April 2005⁴
3. Stichprobenhafte Erfassung von Messdaten bezüglich Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte zeitlich verteilt über das Jahr 2008 in einer detailliert räumlichen Auflösung

4.3.1 Zeitraum 2005

Für den Zeitraum März/April 2005 stehen zeitlich kontinuierliche Daten sowohl von der Meßstation als auch aus dem Bahnhof zur Verfügung, die allerdings nur 1/10 eines Jahres umfassen. Der gemessene Zeitraum beinhaltet sowohl winterlich kalte als auch sommerlich warme Tage. Die räumliche Differenzierung im Bahnhof ist grob, da nur an vier verschiedenen Orten Meßreihen aufgenommen wurden.

4.3.2 Zeitraum 2008

Für den Zeitraum 2008 stehen kontinuierliche Daten ausschließlich aus den Aufzeichnungen der Wetterstation zur Verfügung. Die Meßdaten aus dem Bahnhof sind räumlich sehr differenziert, allerdings stehen zeitlich nur wenige, über das gesamte Jahr verteilte Stichproben zur Verfügung.

Die Daten aus 2005 erlauben daher eine profunde Analyse der zeitlichen Zusammenhänge innerhalb und zwischen den vier gemessenen Zonen. Die Daten aus 2008 erlauben dagegen eine räumlich differenzierte Untersuchung und eine Extrapolation des Modells auf den gesamten Jahresverlauf.

4.4 Analyse

Folgende Schritte werden unternommen, um die zeitlichen und räumlichen Zusammenhänge der lokalen Raumklimata zu quantifizieren, zu prüfen und zu erläutern:

1. Modellentwicklung aufgrund der Daten aus 2005. Ziel ist die Erkenntnis über das dynamische Verhalten der Zonen untereinander.
2. Überprüfung des Modells mit den stichprobenhaft über das gesamte Jahr 2008 erhobenen Daten

³mit freundlicher Unterstützung zur Verfügung gestellt durch die Fa. meteomedia

⁴mit freundlicher Unterstützung zur Verfügung gestellt durch die Fa. Delzer Kybernetik

3. Falls Überprüfung positiv: Abschätzung der Häufigkeit bestimmter Temperaturintervalle in 2008
4. Untersuchung der differenzierten räumlichen Zusammenhänge anhand der stichprobenhaften Messungen in 2008
5. Diskussion der Ergebnisse

4.4.1 Entwicklung eines zeitlich-räumlichen Modells

Die statistische Analyse der einfachen lineare Modelle wurde mit der freien Software *R* vorgenommen. Die verwendeten Daten stammen aus Messungen zwischen dem 11.03.2005 und 18.04.2005 und liegen als Stundenwerte vor. Die an den folgenden Orten gemessenen Werte geben die räumliche Reihenfolge von außen nach innen vor:

1. Wetterstation
2. Bahnsteig
3. Querbahnsteig bzw. Brücke
4. Empfangshalle
5. ServicePoint

Die Wetterstation ist eine Meßeinrichtung, welche sich auf einem Mast hoch über den Dächern von Darmstadt befindet. Der Bahnsteig befindet sich in einer Senke im Boden, das Meßgerät wurde jedoch etwa 2m über dem Boden angebracht. An der Position des Meßgerätes gibt es über dem Bahnsteig ein Regendach, jedoch keinen seitlichen Wetterschutz. Der Querbahnsteig befindet sich über dem Bahnsteig auf Höhe der Empfangshalle und ist teilweise eingehaust⁵. Die Empfangshalle befindet sich im Empfangsgebäude und ist nach außen geschlossen. Allerdings sind bei starken Personenströmen die Zugänge nach Süden, Osten und Westen permanent geöffnet. Der ServicePoint befindet sich innerhalb der Empfangshalle und ist teilweise geschlossen, auf der Bedienseite über der Brüstung jedoch komplett geöffnet. Der ServicePoint kann als einziger der gemessenen Orte aktiv beheizt werden, allerdings nur durch Heizstrahler, keine Lufterhitzer. Eine Raumkühlung, Be- oder Entfeuchtung ist an keinem der gemessenen Orte möglich.

Abbildung 4.1 zeigt in der obersten Zeile die zeitgleichen Temperaturverläufe an allen fünf Meßorten. In der zweiten Zeile sind die zur selben Zeit gemessenen relativen Luftfeuchten zu sehen, welche unter anderem umgekehrt proportional von der Temperatur abhängen. Die Werte für Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit wurden in 2005 nur an der Wetterstation gemessen.

Messung an der Wetterstation und im Bahnhof

Zunächst wird der thermische Zusammenhang zwischen Wetterstation und Bahnsteig untersucht. Der Bahnsteigbereich ist wie die Wetterstation dem Außenbereich zuzuordnen, allerdings überdacht und in Bodennähe. Die Scatterplot-Matrix in Abbildung 4.2 zeigt die Abhängigkeiten verschiedener thermodynamischer Zustandsgrößen zur jeweils selben Zeit an den beiden Orten.

⁵nach Norden und nach unten offen

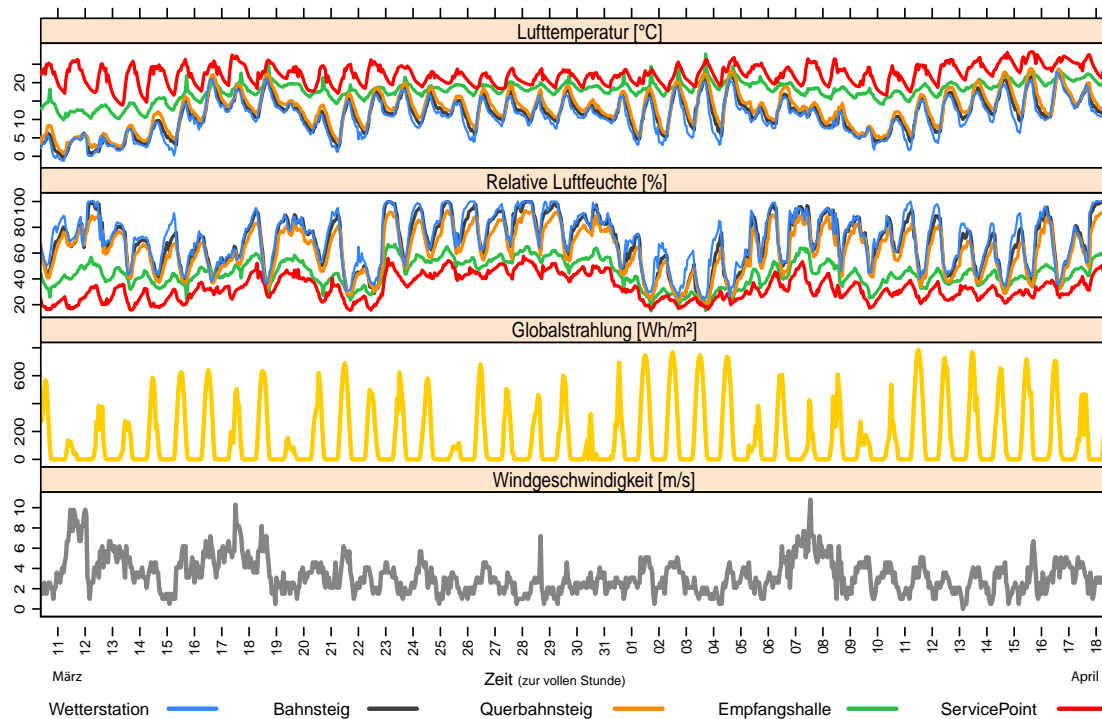


Abbildung 4.1: Verlauf von Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit

Den größten linearen Zusammenhang findet man jeweils bei den Zustandsgrößen Lufttemperatur und relative Luftfeuchte. Das Abhängigkeitsverhältnis ist proportional: Je höher die Temperatur in der Wetterstation, desto höher die Temperatur auf dem Bahnsteig. Allerdings sind die Temperaturen nicht gleich, selbst das Verhältnis der Temperaturwerte zueinander ist nicht immer gleich. Auf den Bildern ist deutlich ein gewisses Maß an Streuung zu erkennen, woraus sich schließen läßt, daß der thermische Einfluß des Bahnsteigbauwerks nicht immer gleich ist. Die Störung könnte beispielsweise durch wartende Reisende oder Züge verursacht werden.

Der Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte an jeweils ein und demselben Ort ist erwartungsgemäß umgekehrt proportional. Allerdings ist die Streuung hier viel größer, da offensichtlich auch die anderen für die relative Luftfeuchte relevanten Größen wie absolute Luftfeuchte, spezifische Enthalpie und Luftdruck schwanken.

Der Scatterplot für Lufttemperatur an einem Ort und relativer Luftfeuchte an dem jeweils anderen Ort streut sehr stark. Offensichtlich reicht die Lufttemperatur an einem Ort nicht als einziger Eingangsparameter für die Vorhersage von Lufttemperatur *und* relativer Luftfeuchte an dem anderen Ort aus.

Die Zusammenhänge zwischen Globalstrahlung und den Zustandsgrößen Lufttemperatur und relative Luftfeuchte sind asymmetrisch. Das liegt daran, daß die Globalstrahlung nachts grundsätzlich Null ist⁶, tagsüber aber nicht immer voll ausschlägt. Die Strahlung hängt vom Wetter, vom

⁶Negative Abstrahlung in den Nachthimmel wird nicht gemessen

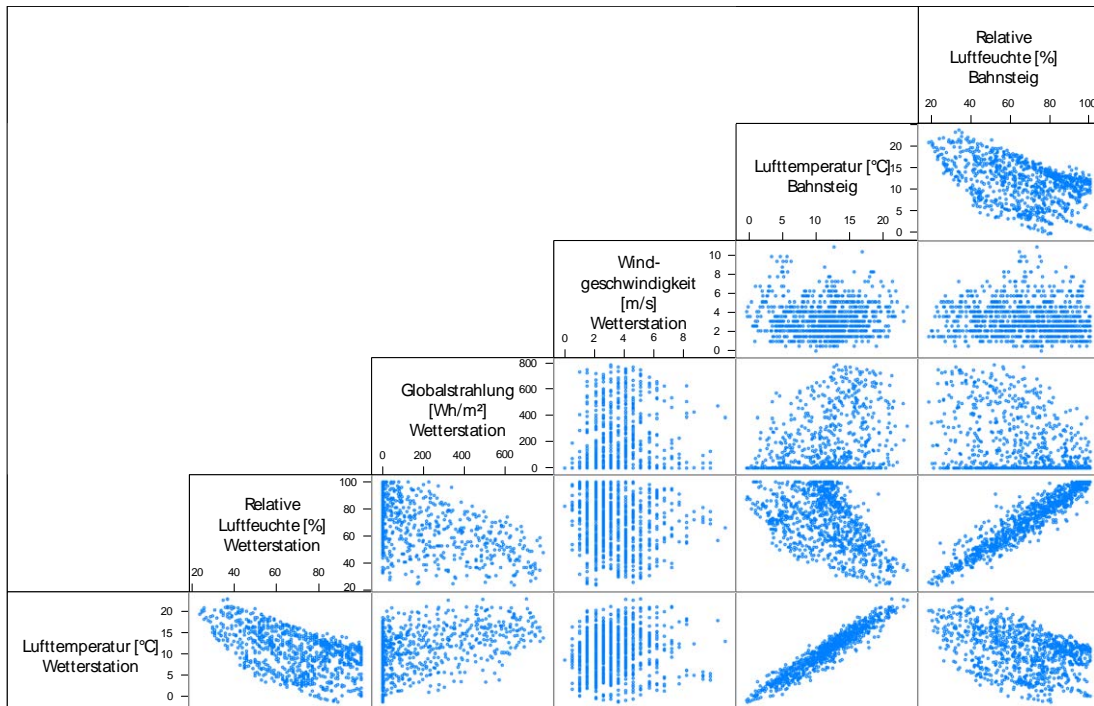


Abbildung 4.2: Scatterplot-Matrix für den Vergleich thermischer Zustände an der Wetterstation und auf dem Bahnsteig

Bewölkungsgrad sowie in den Morgen- und Abendstunden stark von der Jahreszeit ab. Insgesamt kommen Nullwerte und kleine Werte über Null deutlich häufiger vor als hohe Strahlungswerte. Einen Einfluß von Globalstrahlung auf die anderen thermischen Zustandsgrößen gibt es daher nur tagsüber. Allerdings läßt sich ein Trend erkennen, wonach eine hohe Globalstrahlung eher hohe Temperaturen und niedrige relative Luftfeuchten nach sich zieht.

Die Meßwerte für Windgeschwindigkeiten an der Wetterstation sind nicht stetig, sondern in diskreten Schritten von 1 m/s aufgezeichnet worden. Da 2005 keine Messungen von Luftgeschwindigkeiten auf den Bahnsteigen oder innerhalb des Bahnhofsgebäudes erhoben wurden, sind keine direkten Vergleiche innerhalb der Zustandsgröße an verschiedenen Orten möglich. Die Scatterplots zwischen Windgeschwindigkeit und den anderen Zustandsgrößen streuen sehr stark und lassen keinen eindeutigen Zusammenhang erkennen. Offensichtlich sind Windgeschwindigkeiten zwischen 2 m/s und 4 m/s besonders häufig, höhere Geschwindigkeiten oder Windstille dagegen eher selten.

Auf die Darstellung der gleichen Größen für Querbahnsteig und Empfangshalle wird an dieser Stelle aus Platzgründen verzichtet. Stattdessen werden in Abbildung 4.3 die Zustandsgrößen Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Globalstrahlung für die Meßorte Wetterstation und ServicePoint in Beziehung gesetzt, da dieser im Gegensatz zu Wetterstation und Bahnsteig den innersten Raum des betrachteten Bahnhofmodells darstellt.

Zunächst fällt auf, daß die relative Luftfeuchte im ServicePoint nur maximal Werte um 60% an-

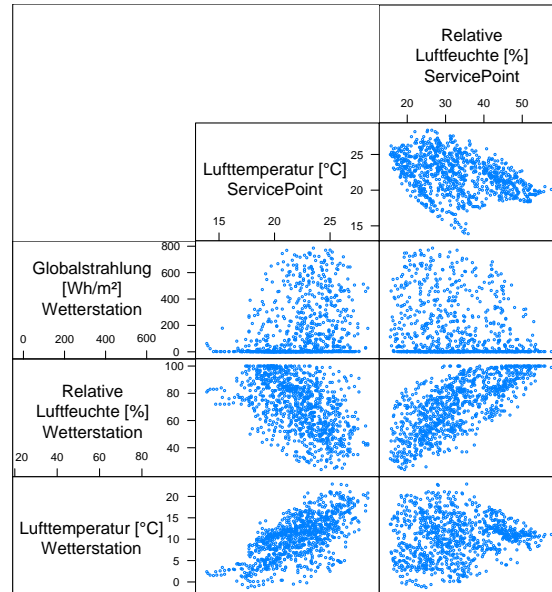


Abbildung 4.3: Scatterplot-Matrix für den Vergleich thermischer Zustände an der Wetterstation und im ServicePoint

nimmt und die Skalierung entsprechend angepaßt ist. Temperatur und relative Luftfeuchte stehen auch hier in einer umgekehrt proportionalen Beziehung zueinander, allerdings fehlen die Werte in dem Bereich mit geringen Temperaturen und gleichzeitig hohen relativen Luftfeuchten. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß während der Betriebszeit bei kalten Außentemperaturen im ServicePoint Heizstrahler eingesetzt werden und die lokale Temperatur gegenüber der umgebenden Empfangshalle steigt, die absolute Luftfeuchte in der gesamten Halle jedoch dieselbe bleibt.

Vergleicht man die beiden Scatterplots, welche jeweils Temperatur und Luftfeuchte im ServicePoint und in der Wetterstation in Beziehung setzen, mit den entsprechenden Plots für die Orte Wetterstation und Bahnsteig in Abbildung 4.2, so fällt auf, daß die Streuung in Abbildung 4.3 deutlich höher ausfällt. Dieses Phänomen ist darauf zurückzuführen, daß der ServicePoint

- durch seine Lage im Innern des Gebäudes und mehreren thermischen Hüllen nicht so stark vom Außenklima abhängt wie der Bahnsteig
- kleiner ist als der Bahnsteig und klimatisch stärker schwankt
- unter menschlichem Einfluß steht, z.B. durch Heizstrahler und andere technische Geräte.

Im Folgenden wird untersucht, mit welcher Verzögerung sich Veränderungen im Außenklima auf die verschiedenen Klimazonen eines Bahnhofs auswirken. Zunächst werden wieder die Lufttemperaturen und relativen Luftfeuchten von der Wetterstation und dem Bahnsteig betrachtet.

Abbildung 4.4 zeigt im oberen Teil vier sogenannte Lagplots⁷. Es werden die Regressionen für die beiden Variablen *Lufttemperatur Wetterstation* und *Lufttemperatur Bahnsteig* berechnet. Die

⁷Ein Lag ist ein zeitlicher Abstand

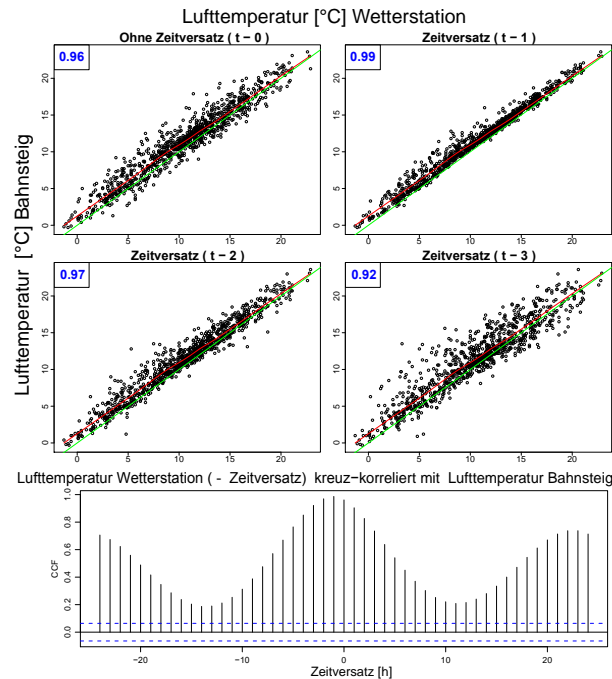


Abbildung 4.4: Lagplots der Regressionsanalysen zwischen den Lufttemperaturen in der Wetterstation und am Bahnsteig

Berechnungen unterscheiden sich dadurch, daß zunächst die zeitgleichen Werte aneinander regre- diert werden ($t = 0$), und dann die Partnerwerte des Bahnsteiges jeweils um $t=1$ bis 3 Stunden verschoben werden. Die grüne Linie stellt die Identitätsfunktion $f(T) = T$ dar, welche in diesem Fall annähernd der Modellgeraden der linearen Regression entspricht. Die rote Kurve ist der Trend der Punktwolke. Die Zahl links oben in jedem Plot gibt an, wieviel Prozent der Stichproben hinreichend genau durch die Regressionsfunktion erklärt werden können. Erstaunlicherweise ist nicht das Ergebnis der Regression zeitgleicher Zahlenpaare am besten, sondern das der Paare, bei denen die Temperatur auf dem Bahnsteig eine Stunde nach der Temperatur in der Wetterstation gemessen wurde. Hier können 99% aller Meßwerte hinreichend durch die Regression erklärt werden. Die Erklärbarkeit der Meßwerte nimmt bei Regressionen mit noch größerem Zeitversatz weiter ab, was hier aus Platzgründen aber nicht bildlich dargestellt wird. Interessant ist aber auch, daß die Streuung auf beiden Seiten der grünen Regressionsgeraden höchst unterschiedlich ist. Ausreißer, bei denen die Lufttemperatur in der Wetterstation höher ist als auf dem Bahnsteig, treten deutlich seltener auf als solche, bei denen der Lufttemperatur über dem Bahnsteig nach oben ausreißt. Es liegt also das Phänomen von asymmetrischen bzw. schiefverteilten Abweichungen von der Regressionsgerade vor. Im unteren Drittel der Abbildung werden die verschiedenen Kreuzkorrelationsfaktoren bei unterschiedlichen Time lags bzw. Zeitverzögerungen dargestellt. Am größten ist tatsächlich die Korrelation, wenn die Temperatur auf dem Bahnsteig der an der Wetterstation um eine Stunde nachläuft. Durch die tageszeitliche Periodizität bedingt wachsen die Korrelationsfaktoren bei einem Lag von ± 24 Stunden wieder an.

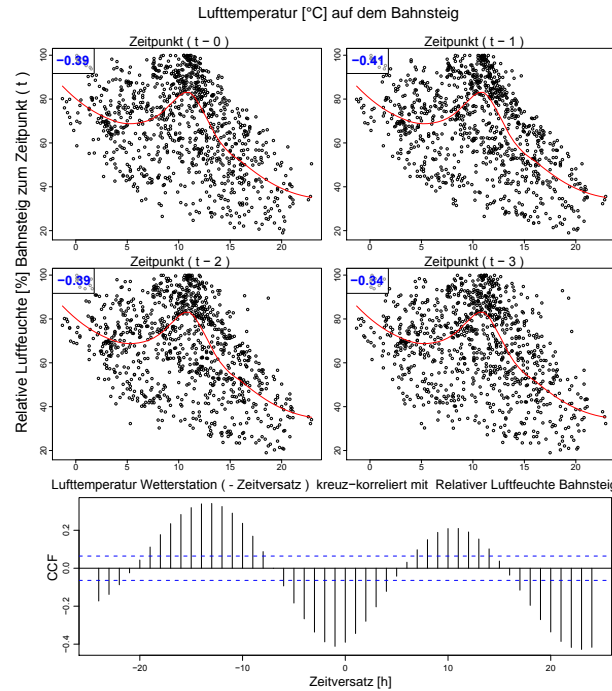


Abbildung 4.5: Lagplots der Regressionsanalysen zwischen Lufttemperatur in der Wetterstation und relativer Luftfeuchte am Bahnsteig

Die Untersuchung der zeitlichen Verzögerung zwischen der relativen Luftfeuchte in der Umgebung der Wetterstation und auf dem Bahnhof führt zu ähnlichen Ergebnissen. In Abbildung 4.5 wird der zeitliche Abstand des Einflusses der Lufttemperatur an der Wetterstation auf die relative Luftfeuchte über dem Bahnsteig analysiert. Wieder ist der Einfluß bei einem Abstand von einer Stunde am größten. Allerdings streuen die Werte so stark, daß nur ein Kreuzkorrelationskoeffizient von 0,41 erreicht wird. Sein Vorzeichen ist negativ, da hohe Temperaturen niedrige relative Luftfeuchten verursachen und umgekehrt. Da die Erklärbarkeit der lokalen relativen Luftfeuchte im Bahnhof durch die Lufttemperatur an der Wetterstation gering ist, kann diese nicht als einziger Eingangsparameter für ein Modell zur Schätzung der relativen Luftfeuchte im Bahnhof herangezogen werden. Die rote Trendkurve ist hier auch nicht annähernd eine Gerade wie in Abbildung 4.4, sondern gekrümmt, aufgrund einer Datenhäufung bei klimatischen Zuständen mit mittleren Temperaturen an der Wetterstation und annähernd 100% relative Luftfeuchte am Bahnsteig.

Ein Grund für die starke Streuung im Zusammenhang zwischen Temperatur und relativer Luftfeuchte könnten Bewölkung und Niederschlag sein, die sich in den Meßwerten der Globalstrahlung indirekt wiederfinden. Aus diesem Grund wird der zeitverzögerte Einfluß der Globalstrahlung auf Lufttemperatur und relative Luftfeuchte über dem Bahnsteig untersucht.

Abbildung 4.6 stellt den zeitverzögerten Einfluß der Globalstrahlung auf die lokale Lufttemperatur am Bahnsteig dar. Erstaunlicherweise wirkt sich die Globalstrahlung erst mit einer Verzögerung von 3 bis 4 Stunden auf die lokale Lufttemperatur aus. Offensichtlich dauert es so lange, bis sich die angestrahlten Bauteile des Bahnsteigs erwärmen und die Umgebungsluft konvektiv aufhei-

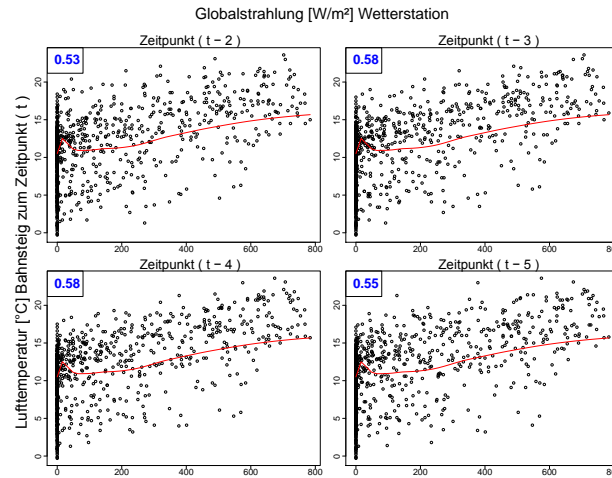


Abbildung 4.6: Lagplots der Regressionsanalysen zwischen Globalstrahlung und Lufttemperatur am Bahnsteig

zen. Die Erklärbarkeit der Lufttemperaturen durch die Globalstrahlung liegt im Mittel bei 58%. Allerdings ist die Korrelation nachts während der Abwesenheit jeglicher Globalstrahlung gleich Null, und tagsüber entsprechend höher als 58%. Die starke Streuung nimmt mit zunehmender Globalstrahlung und Temperatur ab.

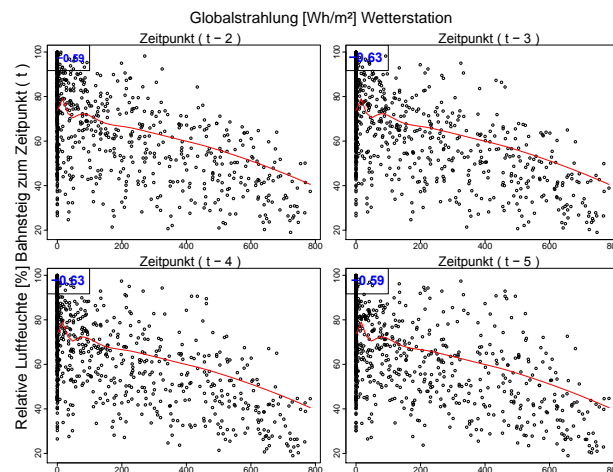


Abbildung 4.7: Lagplots der Regressionsanalysen zwischen Globalstrahlung und relativer Luftfeuchte am Bahnsteig

Der Einfluß der Globalstrahlung auf die lokale relative Luftfeuchte ist ebenfalls bei einer Verzögerung von 3 bis 4 Stunden am stärksten. Die negative Korrelation ist in ihrem Betrag sogar etwas größer als bei der Korrelation zwischen Globalstrahlung und Temperatur, jedoch nicht so hoch wie die Korrelation zwischen den relativen Luftfeuchten an der Wetterstation und am Boden.

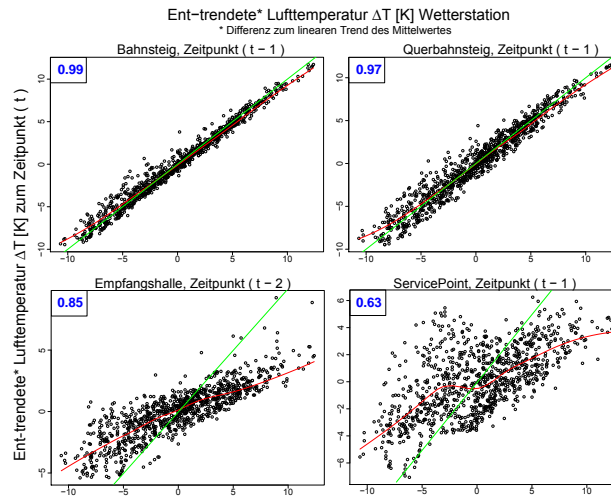


Abbildung 4.8: Übersicht der verzögerten Einflüsse der Temperatur Wetterstation auf die vier repräsentativen Klimazonen im Bahnhof

Anstelle einer ähnlich detaillierten Darstellung der verzögerten Einflüsse der einzelnen von außen nach innen geschachtelten Raumzonen werden in Abbildung 4.8 die vier besten Lagplots für Lufttemperaturen an der Wetterstation und Lufttemperaturen an den jeweiligen Orten im Bahnhof dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt die Korrelation und damit die Erklärbarkeit der lokalen Temperatur durch die Temperatur an der Wetterstation von außen nach innen ab. Während Bahnsteig und Querbahnsteig mit 99% und 97% sehr stark von dem meteorologischen Wetter beeinflusst werden, nimmt die Kausalität bereits bei der Empfangshalle stark ab (85%). Erstaunlich ist aber, daß die Verzögerung auf die Empfangshalle mit 2 Stunden größer ist als die Verzögerung auf den in der Halle befindlichen ServicePoint. Dies könnte an der größeren Masse und thermischen Trägheit der Halle liegen und daran, daß der Data-Logger sich auf Überkopfhöhe befand und dadurch den Lufteinströmungen durch die Zugangstüren weniger ausgesetzt war als der Logger im ServicePoint. Bemerkenswert ist ebenfalls, daß die Punktwolke im Uhrzeigersinn kippt und flacher angeordnet ist, je weiter die gemessene Klimazone sich im Bahnhof befindet. Dies ist auf die dämpfende Wirkung der Hüllen sowie der Gebäudemassen zurückzuführen.

Die Temperaturdaten in Abbildung 4.8 sind im Gegensatz zu den vorhergehenden Grafiken zugrundeliegenden Daten „enttrendet“ worden. Hintergrund ist, daß die Temperaturwerte im Betrachtungszeitraum einen positiven Trend haben und sich abgesehen von den lokalen Schwankungen stetig erhöhen. Da die Untersuchung aber gerade die *lokalen* Schwankungen und deren Zusammenhänge im Fokus hat, werden nicht die absoluten Temperaturen, sondern die Differenzen zum von der Zeit abhängigen linearen Trend betrachtet. Das Enttrending ist jedoch nicht zulässig, wenn verschiedene physikalische Größen kreuzweise untersucht werden, deren jahreszeitliche Trends grundsätzlich unterschiedlich sind, wie z.B. bei Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalysen für Lufttemperaturen von außen nach innen diskutiert. Dabei soll quantifiziert werden, wie stark sich ein bestimmter thermischer Zustand an der Wetterstation auf die thermische Situation auf dem Bahnsteig aus-

wirkt, wie sich dessen Zustand auf den Querbahnsteig auswirkt, dieser auf die Empfangshalle, und die Halle auf den in ihr befindlichen ServicePoint. Die Analysen, welche den gleichzeitigen Einfluß mehrerer unterschiedlich weit außen liegender Zonen auf die Halle oder den ServicePoint zum Gegenstand haben, werden der Übersichtlichkeit halber nicht wiedergegeben und sind für das Verständnis der Zusammenhänge nicht relevant, da die Erklärbarkeiten der Modelle nur unwesentlich verbessert würden.

Bahnsteig

Zunächst wird die Lufttemperatur der Zone Bahnsteig an der Lufttemperatur der Wetterstation regrediert, das heißt, es wird eine einfache lineare Funktion optimiert, die aus dem Argument *Lufttemperatur Wetterstation* möglichst gut die *Lufttemperatur am Bahnsteig* approximiert⁸. Wie bereits in Abbildung 4.4 dargestellt eignen sich die Temperaturmeßwerte der Wetterstation zum Zeitpunkt *t-1 Stunde* am besten, um optimale Temperaturwerte den Bahnsteig zum Zeitpunkt *t* zu berechnen. Das Ergebnis wird in Gleichung 4.1 als lineare Zuordnung der Form $T_y = \beta_0 + \beta_1 T_x$ dargestellt:

$$T_{BS,t} = 0 + 0,946T_{WS,t-1} \quad (4.1)$$

Der thermische Zustand an der Wetterstation benötigt also eine Stunde, um sich am Boden beziehungsweise am Bahnsteig auszuwirken. Eine konstante Verschiebung der Temperatur nach oben oder unten findet nicht statt ($\beta_0 = 0$). Allerdings bewirkt der Bahnsteig eine Dämpfung der Temperatur mit dem Faktor 94,6%. Diese Dämpfung ist hochsignifikant. Die Güte der Schätzung wird von der Software *R* mit einem Multiplen R^2 sowie Angepaßten R^2 von jeweils 0,975 bewertet, was außerordentlich hoch ist⁹. Die Verläufe der Argumente (Temperaturwerte an der Wetterstation zum Zeitpunkt *t-1*), die Funktionswerte (Berechnete Temperaturwerte am Bahnsteig zum Zeitpunkt *t*) sowie die tatsächlich am Bahnsteig gemessenen Referenzwerte sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Zu beachten ist, daß nicht die absoluten Temperaturen in °C, sondern die Differenzen zum Trend des Mittelwertes in Kelvin [K] darstellt werden.

In Abbildung 4.10 sind einige diagnostische Graphen zur genaueren Beurteilung der Qualität des gefundenen Modells dargestellt. Im Bild links oben sind die berechneten Abweichungen von der Trendtemperatur gegen ihre Residuen dargestellt. Das Modell besitzt offenbar eine größere Streuung für Werte, die zu hoch geschätzt wurden. Es gibt zwar auch viele Abweichungen nach unten, diese sind betraglich jedoch kleiner. Es kann also nicht von einer Symmetrie der Residuen gesprochen werden. Das Bild rechts oben zeigt die Residuen entlang der Zeitachse. Vergleicht man diese Darstellung mit Abbildung 4.11, so stellt man fest, daß die größten Abweichungen nicht bei

⁸*Möglichst gut* bedeutet, daß die Summe der Abstandsquadrate zwischen Messung und Schätzung eines jeden Wertepaares minimiert wird. Es handelt sich also um einen „Kleinste-Quadrate-Schätzer“

⁹Das Multiple R^2 und das Angepaßte R^2 sind in der quantitativen Statistik bekannte Größen, die die Qualität eines Regressionsmodells beschreiben. Ihr Wertebereich liegt zwischen 0 (Modellwerte stimmen mit Meßwerten überhaupt nicht überein und 1 (völlige Übereinstimmung zwischen Modell- und Meßwerten). Auf die Herleitung und detaillierte Beschreibung dieser beiden Größen wird an dieser Stelle verzichtet.

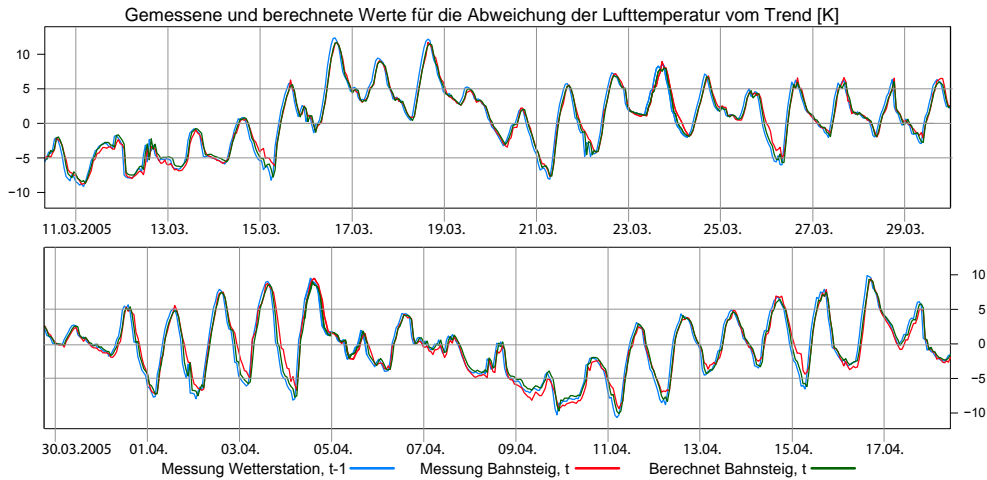


Abbildung 4.9: Regression der Temperaturwerte Bahnsteig an denen der Wetterstation

extrem hohen oder niedrigen Temperaturen auftreten, sondern bei extrem starken Schwankungen um den Trendmittelwert, und das Modell die Geschwindigkeit der Veränderung zu hoch schätzt¹⁰.

Der Autokorrelationskoeffizient der Residuen zeigt an, inwiefern zeitlich aufeinanderfolgende Residuen untereinander korreliert sind. Das heißt, ob ein Schätzfehler in einer Richtung bewirkt, daß der chronologisch nächste Wert ebenfalls in dieselbe Richtung fehlgeschätzt wird. Sämtliche Werte, die innerhalb der nächsten 40 Stunden nach einem bestimmt Meßereignis folgen, sind positiv korreliert, allerdings mit absteigender Tendenz. Der partielle Autokorrelationskoeffizient, dargestellt in Abbildung 4.10 rechts unten, zeigt an, wie viele Stunden nach einem bestimmten Meßereignis noch von einer signifikanten Korrelation gesprochen werden kann. Die Grenze ist mit einer gestrichelten blauen Linie markiert. In diesem Fall läßt sich sagen, daß die Residuen von drei aufeinanderfolgenden Messungen signifikant positiv miteinander korreliert sind. Mit dieser Erkenntnis läßt sich ein verfeinertes autoregressives Modell bestimmen, in dem die Residuen nicht unabhängig normalverteilt sind, sondern bis in die dritte Stufe voneinander abhängen. Da die Ergebnisse dieser Studie das Ergebnis dieser Arbeit nicht signifikant erweitern, wird auf eine detaillierte Darstellung des autoregressiven Modells aus Platzgründen verzichtet.

Querbahnsteig

Im nächsten Schritt wird die Lufttemperatur des Querbahnsteigs¹¹ an der bereits bekannten Lufttemperatur Bahnsteig regrediert¹². Die Untersuchungen mit verschiedenen Zeitverschiebungen haben gezeigt, daß abermals eine zeitliche Verschiebung von einer Stunde gegenüber dem Bahnsteig den besten „Fit“¹³ liefert, siehe Abbildung 4.8 und Gleichung 4.2.

¹⁰Wie z.B. an den Tagen 02., 03. und 04. April sowie 15. April

¹¹Brücke über den Bahnsteigen auf dem Höhenniveau der Empfangshalle

¹²Zur Modellierung werden die Meßwerte des Bahnsteigs, nicht die im vorhergehenden Schritt berechneten Werte herangezogen

¹³Anpassung der Rechenwerte an Meßwerte mittels Kleinst-Quadrate-Schätzer

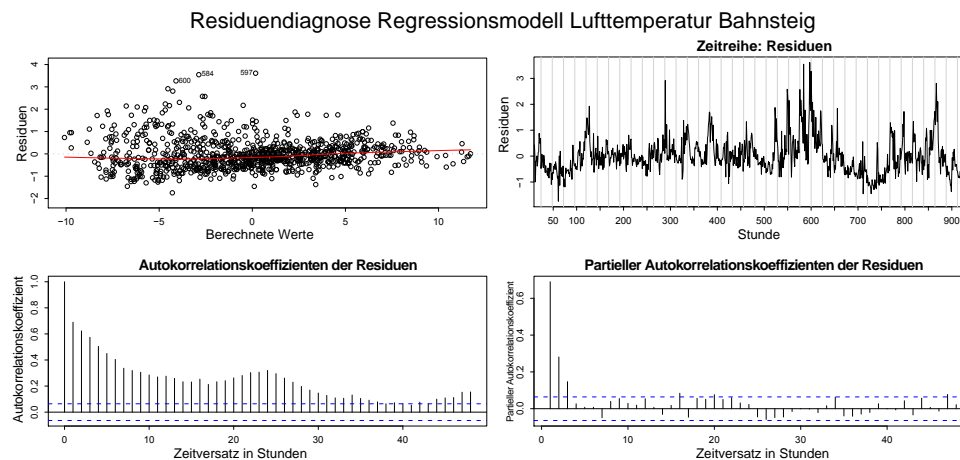


Abbildung 4.10: Diagnostische Graphen des Regressionsmodells für die Bahnsteigttemperatur

$$T_{QB,t} = 0 + 1,006T_{BS,t-1} \quad (4.2)$$

Wieder gibt es keinen signifikanten „Shift“¹⁴ der Temperaturwerte nach oben oder unten. Das heißt, der Querbahnsteig stellt keine meßbare Wärmequelle oder -senke dar. Diesmal findet keine Dämpfung der Temperaturwerte statt, sondern eine geringfügige Streckung. Betrachtet man dieses Ergebnis jedoch zusammen mit dem Ergebnis aus Gleichung 4.1, so ergibt sich die Erkenntnis, daß die Beeinflussung der Temperatur an der Wetterstation auf die Temperatur am Querbahnsteig zwar zeitlich später erfolgt als die Beeinflussung der Bahnsteigttemperatur durch die Temperatur an der Wetterstation, jedoch mit geringerer Dämpfung. Die gemessenen Argumente, die berechneten Werte sowie die gemessenen Referenzwerte für die räumliche Konstellation Bahnsteig → Querbahnsteig sind graphisch in Abbildung 4.11 dargestellt. Die Gütekriterien Multiples R^2 sowie Angepaßtes R^2 sind mit jeweils 0,9641 fast so hoch wie in der vorangegangenen räumlichen Konstellation.

Abbildung 4.13 zeigt zwei Bilder der Residuendiagnostik. Der Residuenplot gegen die berechneten Werte zeigt in diesem Fall eine annähernd symmetrische Punktwolke. Die Abhängigkeit der Residuen ist dementsprechend geringer, die Autokorrelation ist nur bis in die zweite Stufe signifikant.

Empfangshalle

Der nächste Schritt nach innen ist die Regression der Lufttemperatur in der Empfangshalle an der Lufttemperatur im Querbahnsteig¹⁵. Die besten Ergebnisse werden hier ohne jegliche Zeitverschiebung erzielt. Eine einfache lineare Regression der Form $T_y = \beta_0 + \beta_1 T_x$ bringt die in Gleichung

¹⁴absolute Verschiebung

¹⁵Die Regressionen der Lufttemperatur Empfangshalle an der Lufttemperatur Bahnsteig brachte vergleichbare Ergebnisse und wird aus Platzgründen an dieser Stelle nicht dargestellt

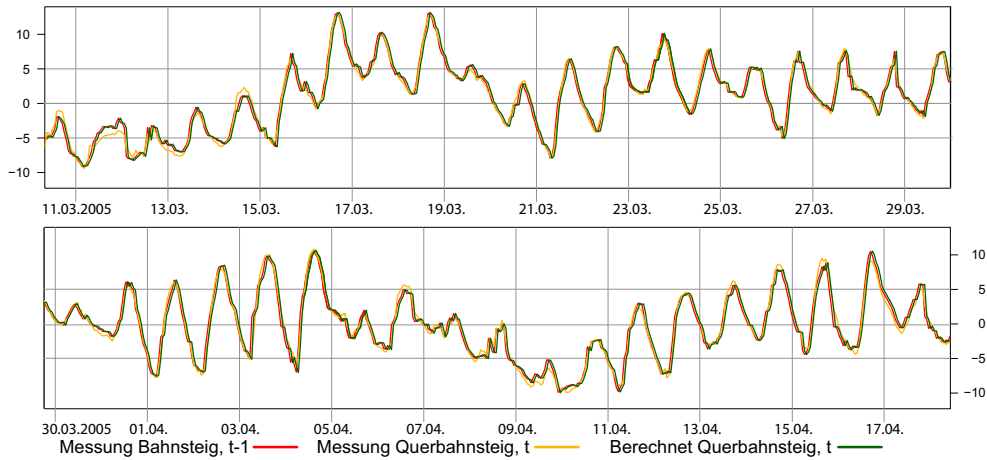


Abbildung 4.11: Gemessene und berechnete Werte für die Abweichung der Lufttemperatur vom Trend [K]

4.3 zusammengefaßten Ergebnisse, jedoch 'nur' mit einer Güte von Multiples $R^2 = 0,7664$ beziehungsweise Angepaßtes $R^2 = 0,7662$. Offensichtlich ist die Dämpfung der Temperatur durch das Empfangsgebäude nicht immer gleich stark. Nach Gleichung 4.3 würden die Temperaturen am Querbahnsteig um etwa die Hälfte gedämpft und zu einer konstanten Basistemperatur von $11,874^\circ\text{C}$ hinzuaddiert werden:

$$T_{Halle,t} = 11,874 + 0,469T_{QB,t} \quad (4.3)$$

Einen deutlich besseren Fit erzeugt eine Regression mit einem Polynom 3. Grades von der allge-

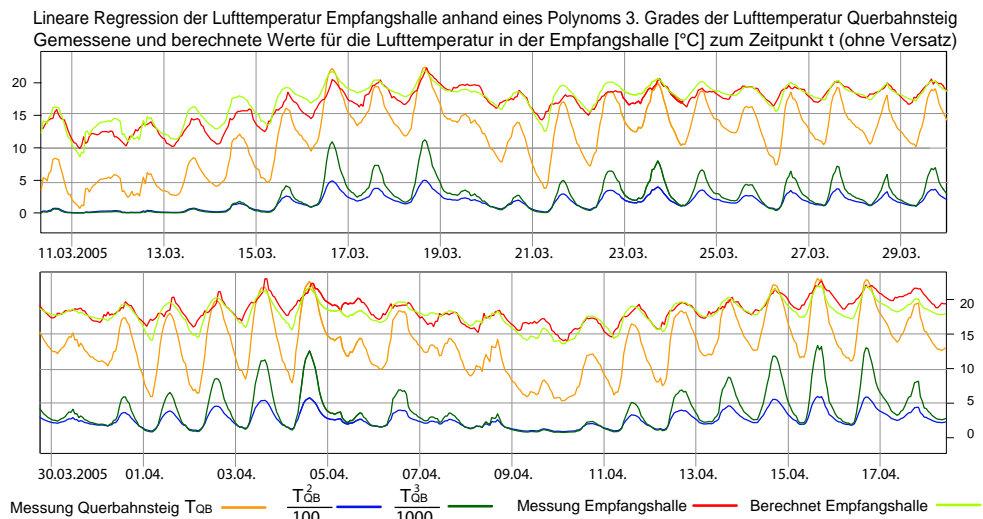


Abbildung 4.12: Regression der Lufttemperatur Empfangshalle an der des Querbahnsteigs

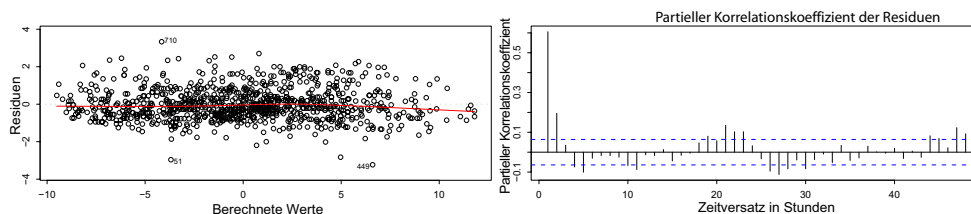


Abbildung 4.13: Residuendiagnose Regressionsmodell Lufttemperatur Querbahnsteig

meinen Form $T_y = \beta_0 + \beta_1 T_x + \beta_2 T_x^2 + \beta_3 T_x^3$. Dieser erreicht ein Multiples R^2 von 0,8108 sowie ein Angepaßtes R^2 von 0,8102. In der dazugehörigen Gleichung 4.4 sind alle Terme hochsignifikant.

$$T_{Halle,t} = 7,518 + 1,633T_{QB,t} - \frac{8,571T_{QB,t}^2}{100} + \frac{1,847T_{QB,t}^3}{1000} \quad (4.4)$$

Die Division des quadratischen und kubischen Terms durch 100 respektive 1000 ändert nichts an der Güte des Ergebnisses, sondern ist nur Skalierung von darstellungskosmetischer Natur, da so die Funktionsverläufe dieser beiden Terme einen ähnlichen Wertebereich wie die Fit- und Meßwerte haben und gemeinsam in einem Koordinatensystem angezeigt werden können. Die Gütekriterien für diese Regression liegen mit ca. 0,81 immer noch deutlich niedriger als die der Regressionen im Außenbereich. Dies deutet darauf hin, daß in der Empfangshalle noch andere thermische Einflüsse eine Rolle spielen, die durch die bisher gemessenen Parameter nicht abgedeckt werden. Ein im Zuge dieser Untersuchung entdeckter, aber an dieser Stelle nicht näher erläuteter Einfluß ist die lokale Erwärmung von bestimmten Zonen innerhalb der Empfangshalle durch die Absorption der unter einem bestimmten Winkel durch die hohen Glasscheiben einfallenden Sonnenstrahlen. Die gemessenen und berechneten Temperaturverläufe sowie die Werte der Terme in der 2. und 3. Potenz sind in Abbildung 4.12 dargestellt.

Die Residuendiagnose in Abbildung 4.14 zeigt eine nahezu symmetrische Verteilung der Residuen. Der partielle Korrelationskoeffizient zeigt keine Korrelation zwischen den Residuen benachbarter Messungen.

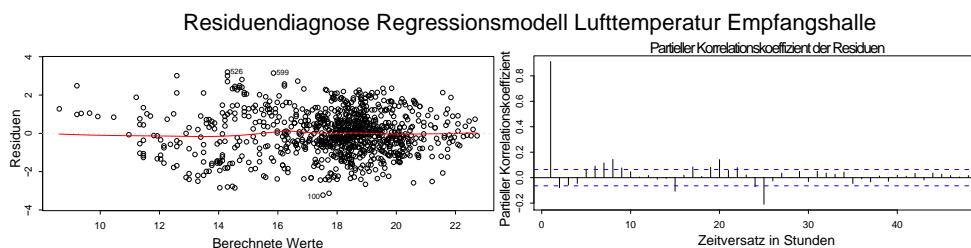


Abbildung 4.14: Diagnostische Graphen des Regressionsmodells für die Lufttemperatur in der Empfangshalle

ServicePoint

Als letzter räumlicher Schritt werden die thermischen Zusammenhänge zwischen Empfangshalle und ServicePoint untersucht. Die Halle umschließt den ServicePoint vollständig und besitzt ein wesentlich größeres Volumen. Bei einem ServicePoint, der sich nicht in Betrieb befindet, wäre also davon auszugehen, daß er ohne signifikanten Zeitverzug den thermischen Zustand der Empfangshalle auf 0m bis 2m Höhe annimmt. Da der ServicePoint jedoch tagsüber durch Service-Mitarbeiter besetzt ist und Wärmequellen in Form von elektrischen Geräten besitzt, ist tagsüber von einer Temperatur leicht oberhalb der Hallentemperatur auszugehen. Die technische Ausrüstung des ServicePoints umfaßt Heizstrahler, welche von oben auf die Köpfe der Mitarbeiter und Kunden strahlen und in der vertikalen Ebene der Frontöffnung angebracht sind. Eine Erhitzung der Luft ist nicht möglich. Das Gerät zur Messung der Lufttemperatur war in einem offenen Fach im Unterschrank des Arbeitsbereichs untergebracht. Zunächst sollen verschiedene Regressionsberechnungen mit unterschiedlichen Zeitverschiebungen zwischen den Meßreihen Empfangshalle und ServicePoint Klarheit über die zeitliche Verzögerung der klimatischen Einflußnahme der Halle auf den ServicePoint schaffen. Die Lagplots in Abbildung 4.15 zeigen, daß es keinen signifikanten Versatz gibt. Allerdings liegt die Erklärbarkeit der Lufttemperatur im ServicePoint durch die Hallentemperatur nur bei 61%. Die Graphen zeigen auch an, woran das liegt: Es gibt praktisch nur Ausreißer, bei denen die tatsächliche Temperatur höher war als die geschätzte. Offensichtlich kann es im ServicePoint nicht kälter sein als in der umgebenden Halle, es kann aber mit höchst unterschiedlichen Abständen wärmer sein. Das mag daran liegen, daß in dieser Darstellung sowohl Messungen während als auch außerhalb der Betriebszeit dargestellt werden.

Da die Strahlungsheizung wie in Abbildung 4.15 gesehen offensichtlich doch einen starken Einfluß auf die Lufttemperatur im ServicePoint besitzt, wird bei der Regressionsmodellierung eine zusätzliche Variable *Heizung* eingeführt, die numerisch betrachtet als Überlaufventil fungiert. Alle Abweichungen in den Meßwerten aus dem ServicePoint, die nicht auf das Verhalten der Variablen *Lufttemperatur Empfangshalle* zurückzuführen sind, werden der Variablen *Heizung* zugeordnet. Das Ergebnis ist in Gleichung 4.5 dargestellt.

$$T_{SP,t} = 5,988 + 0,866T_{Halle,t} + 0,615T_{Hz} \quad (4.5)$$

Alle Terme sind hochsignifikant. Die Temperatur im ServicePoint liegt demnach knapp 6K oberhalb der um den Faktor 0,866 gedämpften Lufttemperatur der umgebenden Halle. Dazu kommt ein synthetisch berechneter Anteil durch Heizung, Personen und Geräte. Alle drei Kurven sowie der berechnete Wert der Lufttemperatur im ServicePoint sind in Abbildung 4.16 dargestellt.

Das Modell liefert bereits gute Schätzungen für die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur im ServicePoint. Allerdings wird die lokale Dynamik des Temperaturverlaufs an einem Tag nicht gut nachempfunden. Das Gütekriterium R^2 liegt bei nur 0,52. Der Einfluß der Heizung ist zu *breit*, das heißt er schiebt die Lufttemperatur während der gesamten Betriebszeit nach oben. Tatsächlich aber gibt es pro Tag eine Temperaturspitze bei etwa 25°C. Die Spitze ist unter den in Abschnitt 3.3.1 zitierten Komfortkriterien eigentlich zu hoch. Außerdem decken sich die Meßwerte scheinbar nicht mit den Aussagen der Service-Mitarbeiter, die sich während der Meßperiode über zu niedrige Temperaturen beschwerten. Offensichtlich findet an kalten Tagen folgender Prozeß statt:

- Die Mitarbeiter beginnen den Arbeitstag in einem zu kalten ServicePoint
 - In diesem Zeitraum manifestiert sich der Eindruck: zu kalt
 - Die Mitarbeiter heizen mit allen ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln
- Die Temperatur steigt zunächst sehr schnell. Je höher das erreichte Niveau ist, desto langsamer vollzieht sich der weitere Anstieg
- Ist die optimale Temperatur erreicht, wird die Heizung *nicht* abgestellt
- Die Heizung übersteuert, bis es im ServicePoint mit 25°C zu heiß ist
 - Die Heizung wird abgestellt
- Die Temperatur fällt zunächst sehr schnell. Je näher das Temperaturniveau dem der umgebenden Halle gleicht, desto langsamer vollzieht sich das weitere Absinken

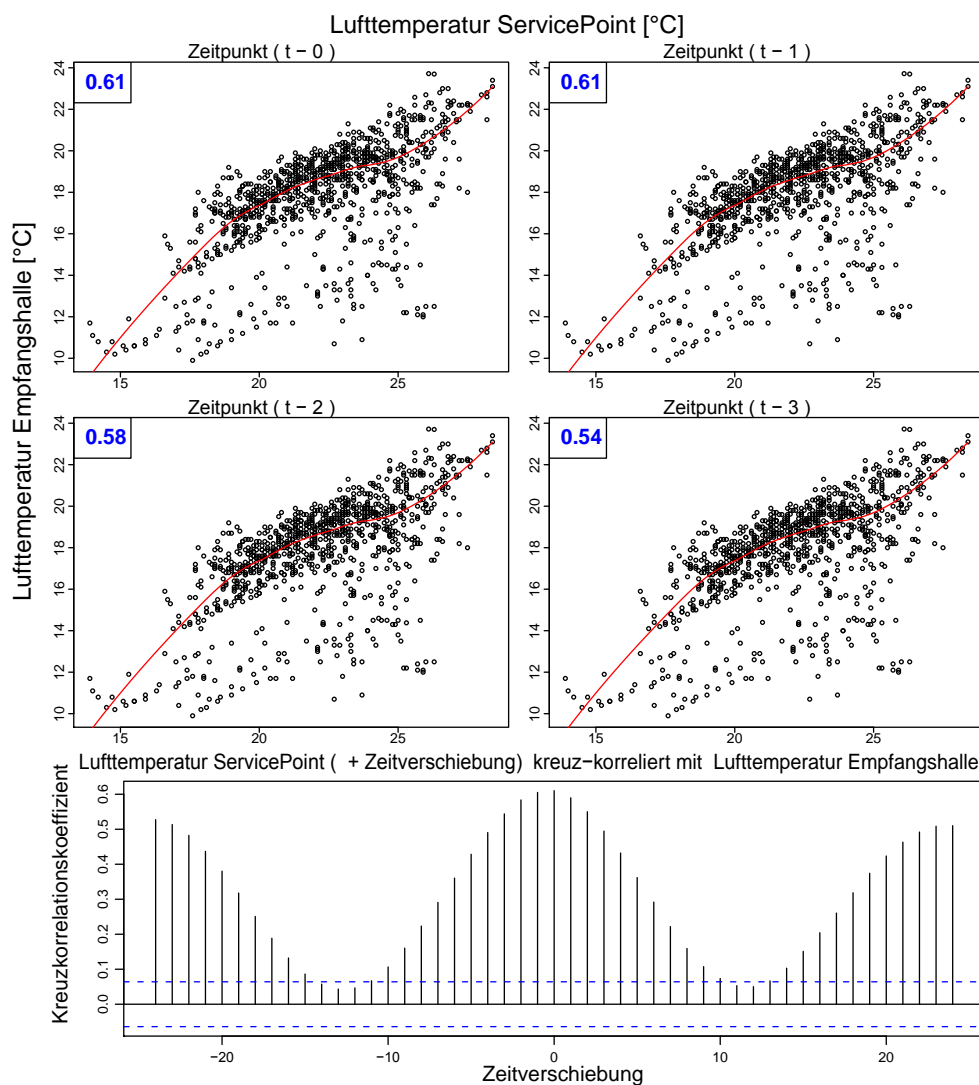


Abbildung 4.15: Lagplots des Regressionsmodells für die Lufttemperatur im ServicePoint

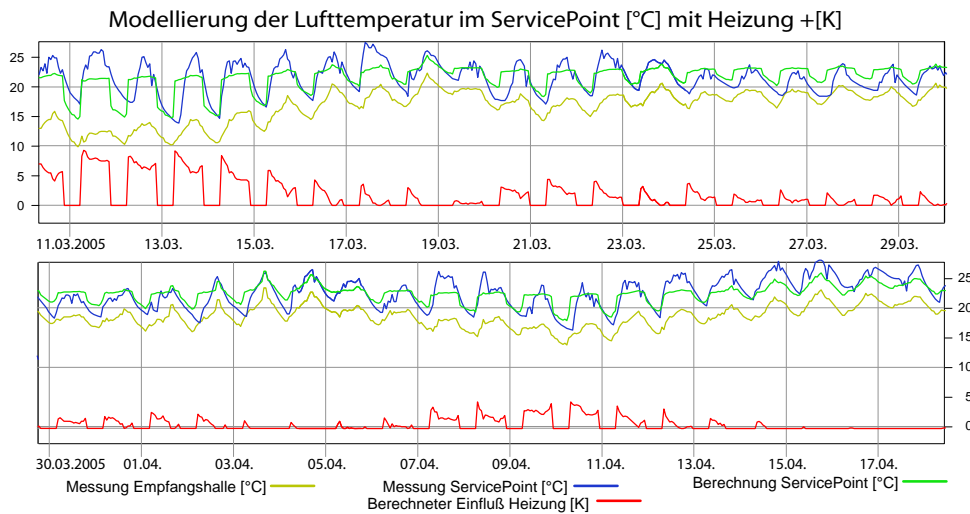


Abbildung 4.16: Regressionsmodell für den ServicePoint mit Heizung

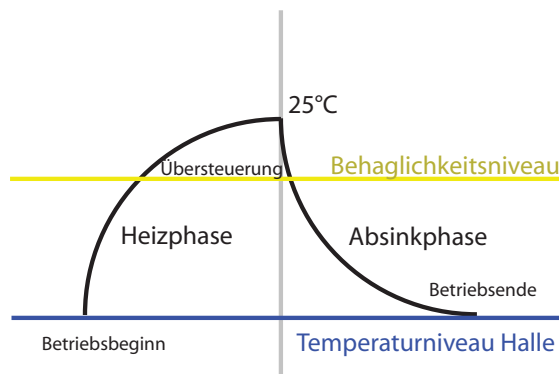


Abbildung 4.17: Schematische Darstellung des Heizprozesses an kalten Tagen im ServicePoint

- Sobald das Temperaturniveau unter die Behaglichkeitsgrenze sinkt, ist es wieder zu kalt. Für einen erneuten Heizzyklus am selben Tag ist es jedoch schon zu spät

Der dynamische Prozeß ist schematisch in Abbildung 4.17 dargestellt. Abbildung 4.18 veranschaulicht, daß die Tageshöchsttemperaturen im ServicePoint in der Regel am späten Nachmittag erreicht werden. Dies kann sowohl auf die menschlich beeinflusste Betriebsweise als auch auf die direkte Sonneneinstrahlung durch die hohen Westfenster zurückzuführen sein. Abbildung 4.19 zeigt, daß die Tageshöchsttemperatur durchschnittlich bei 25°C liegt, ungeachtet der Hallentemperaturen und der in der vorherigen Nacht gemessenen Temperaturen im ServicePoint.

Da bei den thermischen Zuständen im ServicePoint nicht nur die umgebenden Temperaturen, sondern menschlich bedingte dynamische Prozesse und Entscheidungen, Schwellenwerte an bestimmten Uhrzeiten etc... eine maßgebliche Rolle spielen, kann hier mittels linearer Regression kein besseres Ergebnis erzielt werden. Die Regressionsanalyse wird daher auf die nächtlichen

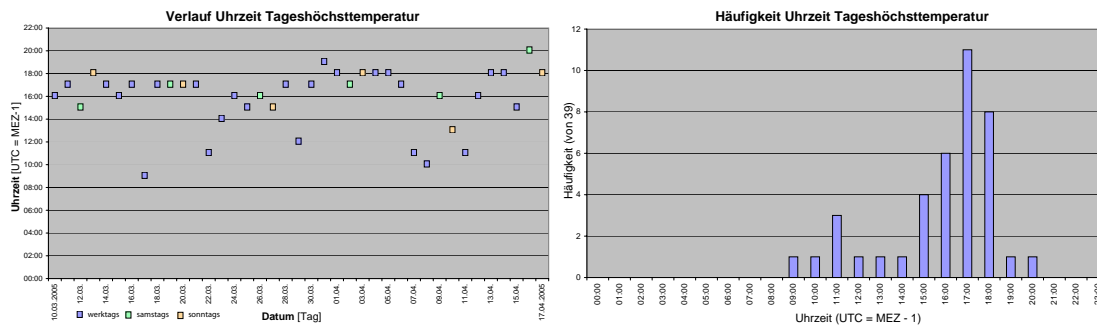


Abbildung 4.18: Uhrzeiten der Tageshöchstwerte Lufttemperatur im ServicePoint

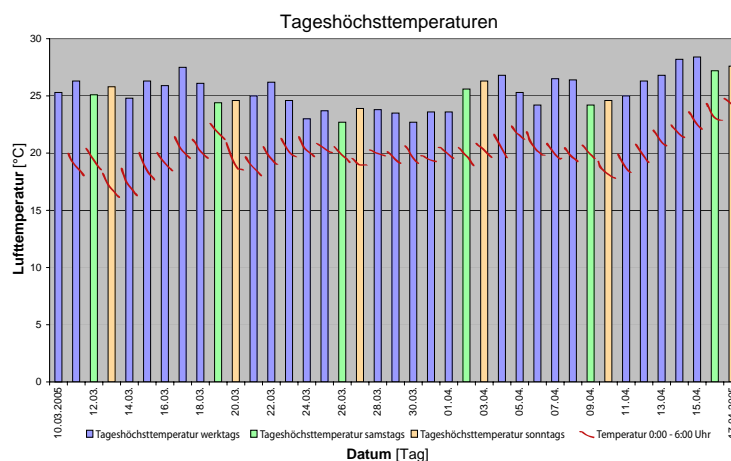


Abbildung 4.19: Verlauf der Tageshöchstwerte Lufttemperatur im ServicePoint

Stunden zwischen 0 Uhr und 6 Uhr beschränkt, an denen der menschliche Einfluß minimal ist. Das Ziel dieser Analyse ist die Entwicklung eines Modells, mit dem es möglich ist, zuverlässige Schätzungen für die Temperatur im ServicePoint bei Betriebsbeginn in Abhängigkeit von der Hallentemperatur während der Nacht abzugeben. Die Modellierung des dynamischen Prozesses mit den vielfältigen menschlichen Einflüssen würde die Entwicklung eines geeigneten Systems von Differentialgleichungen erfordern. Dies würde jedoch über das Ziel dieser Arbeit hinausgehen, zumal der ideale und nicht der suboptimale reale Betrieb von Interesse ist. Daher soll die qualitative Beschreibung an dieser Stelle genügen.

Die Zuordnung von Temperaturen wird graphisch in Abbildung 4.20 dargestellt. In der rechten Hälfte des Graphen, bei Umgebungstemperaturen über 14°C, scheint die Zuordnung linear zu sein: Die Temperatur im ServicePoint liegt 2 bis 3 K über der umgebenden Lufttemperatur. Im Bereich der kühleren Umgebungstemperaturen gibt es drei Punktwolken, die in sich ebenfalls eine lineare Zuordnung vermuten lassen, allerdings mit einer wesentlich größeren Verschiebung gegenüber der Umgebungstemperatur (β_0) und einer größeren Steigung.

Im Erfassungszeitraum 2005 waren vor allem in den ersten 5 Tagen sehr niedrige Temperatu-

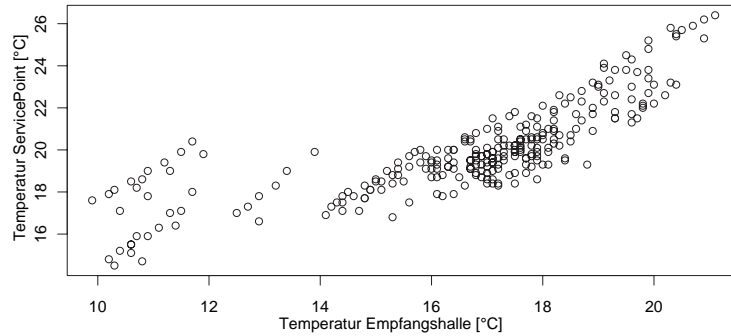


Abbildung 4.20: XY-Plot der Lufttemperaturen in der Empfangshalle und im ServicePoint nachts zwischen 0 und 6 Uhr

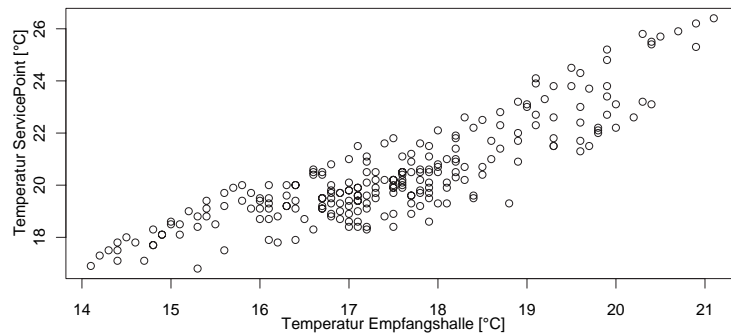


Abbildung 4.21: XY-Plot der Lufttemperaturen Empfangshalle / ServicePoint an warmen Tagen

ren zu verzeichnen. Nimmt man die ersten 35 Wertepaare aus dem Graphen, entsteht das in Abbildung 4.21 dargestellte Bild. Gegenüber Abbildung 4.20 sind die drei separaten Punktwolken verschwunden, es dominiert nun die scheinbar lineare Zuordnung bei gemäßigten bis hohen Umgebungstemperaturen.

Die Zuordnung der Temperaturen an den kalten Tagen scheint selbst nachts chaotisch und ohne einen festen funktionalen Zusammenhang zu sein, siehe Abbildung 4.22.

Für die Regression der Lufttemperatur im ServicePoint an der Hallentemperatur aufgrund der gesamten Meßdaten aus dem Jahr 2005 hat sich ein kubischer Term der Form $T_y = \beta_0 + \beta_1 T_x + \beta_2 T_x^2 + \beta_3 T_x^3$ als optimal erwiesen. Das Modell erreicht ein Angepaßtes R^2 von 0,783. Der Verlauf in Abbildung 4.23 zeigt aber, daß die starken Temperaturschwankungen in den besonders kalten Nächten nicht vom Modell vorhergesagt werden. Allerdings sind die Fehler annähernd symmetrisch, siehe Abbildung 4.24, was bedeutet, daß in kalten Nächten mit großen Temperaturschwankungen im ServicePoint zumindest der Mittelwert eingehalten wird und nur die Streuung bzw. Amplitude zu gering ist.

Das Regressionsmodell 3. Grades sieht wie folgt aus, diesmal ohne darstellungskosmetische Division durch Zehnerpotenzen wie in Gleichung 4.4:

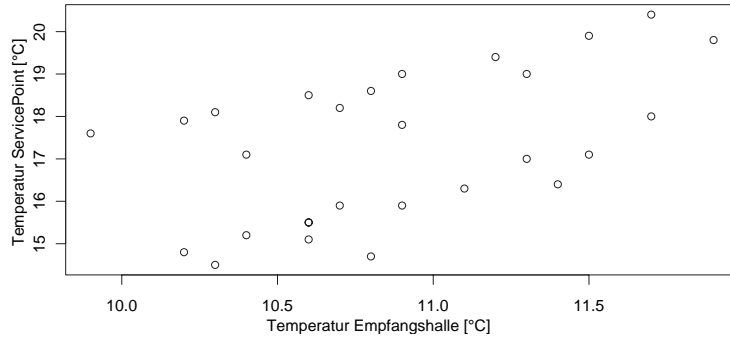


Abbildung 4.22: Zuordnung der Temperaturen in der Empfangshalle und im ServicePoint nachts an besonders kalten Tagen

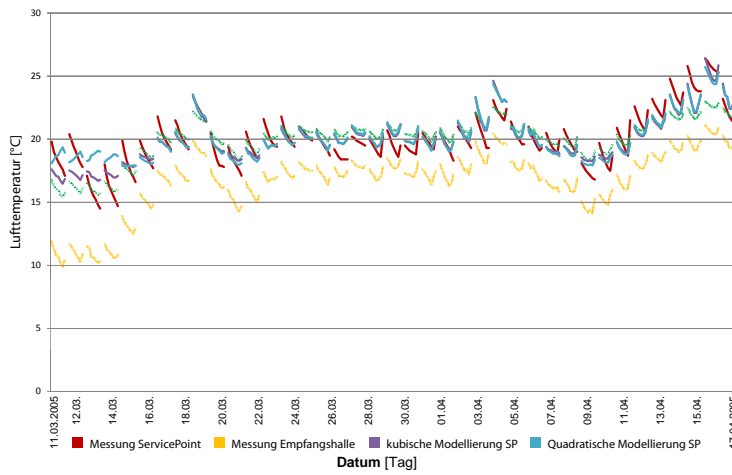


Abbildung 4.23: Meß- und Modellwerte der Lufttemperaturen nachts im Empfangsgebäude

$$T_{SP,t} = -20,5 + 8,06T_{Halle,t} - 0.58T_{Halle,t}^2 + 0.014T_{Halle,t}^3 \quad (4.6)$$

Das Modell, bei dem die ersten 30 Wertepaare entfernt wurden (Abbildung 4.21), wird am besten durch ein quadratisches Modell „gefittet“:

$$T_{SP,t} = 42,77 - 3,676T_{Halle,t} + 0,136T_{Halle,t}^2 \quad (4.7)$$

Das angepaßte $R^2 = 0,793$ ist für das betrachtete Temperaturintervall sogar geringfügig besser, allerdings ist das Modell nicht in der Lage, Umgebungstemperaturen unter 14°C zu verarbeiten. Abbildung 4.25 zeigt den Residuenplot, der annähernd symmetrisch verläuft.

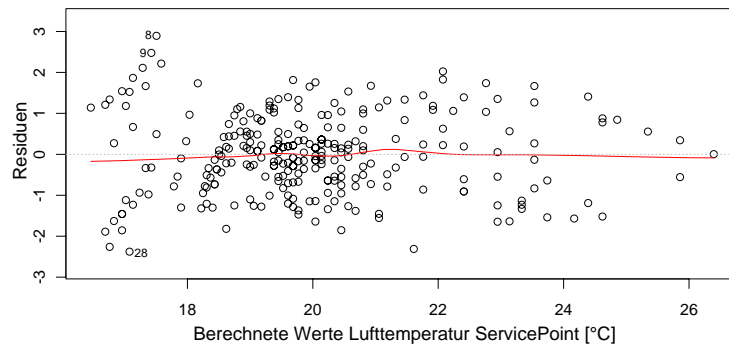


Abbildung 4.24: Residuendiagnose des Regressionsmodells mit einem Polynom 3. Grades

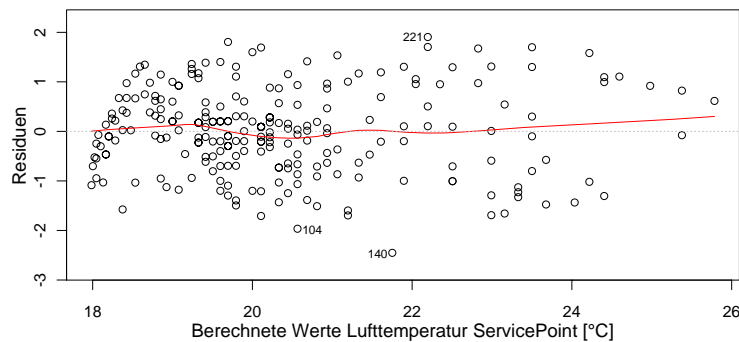


Abbildung 4.25: Residuenplot des quadratischen Modells einer linearen Regression zwischen gemäßigten Hallen- und ServicePointtemperaturen

4.4.2 Extrapolation auf den Jahresverlauf

Im folgenden Abschnitt werden basierend auf den zeitlich-räumlichen Modellen aus Abschnitt 4.4.1 und den kompletten Meßdaten *Wetterstation* aus dem Jahr 2008 Jahrestemperaturverläufe für die vier thermischen Zonen Bahnsteig, Querbahnsteig, Empfangshalle und ServicePoint¹⁶ erstellt. Die stichprobenhaften Messungen im Darmstädter Hauptbahnhof fanden an 13 verschiedenen Tagen zwischen dem 27.03.2008 und 04.01.2009 statt. Dabei wurde an extrem heißen, extrem kalten und klimatisch gemäßigten Tagen gemessen. In den Abbildungen 4.26 bis 4.31 werden jeweils die berechneten Werte als Kurven sowie die realen Meßwerte als Kreise dargestellt. Der ServicePoint wird durch zwei Linien repräsentiert: Die dicke rote Linie berücksichtigt manuelles Heizen tagsüber, die dünne hellrote Linie stellt den berechneten Temperaturverlauf im unbeheizten ServicePoint dar.

Die Abstände zwischen den berechneten Kurven und den Meßpunkten deuten an, daß die berechneten Werte meist niedriger sind als die Meßwerte. Eine genauere Analyse der Abweichungen lassen die Abbildungen Abbildung 4.32 und 4.33 zu.

Die Fehler sind, anders als bei den Analysen für die Werte aus 2005, nicht symmetrisch, sondern

¹⁶ServicePoint mit und ohne unkontrolliert willkürlichen Eingriff wie in der Meßreihe Frühjahr 2005

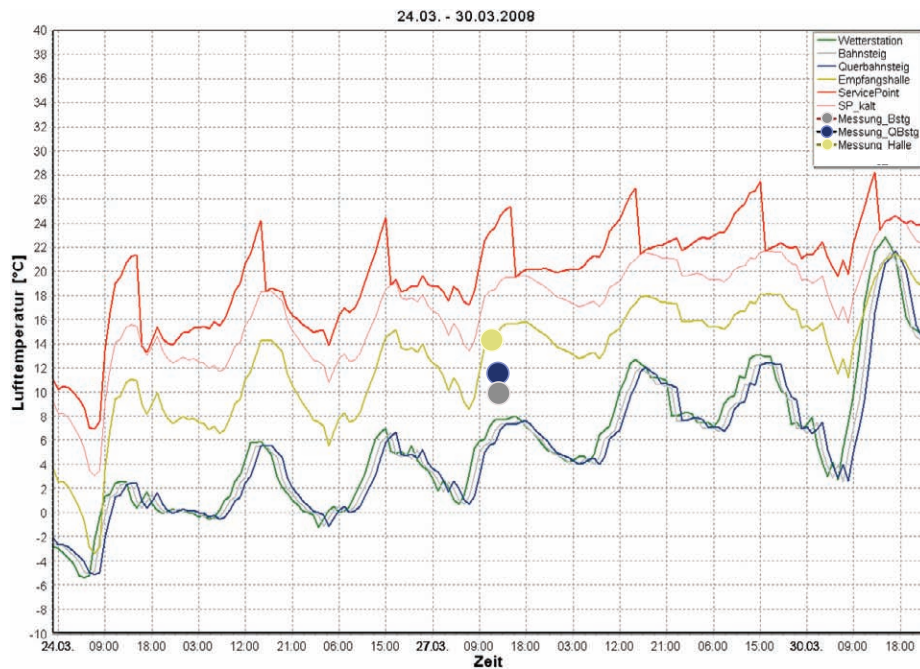


Abbildung 4.26: Wochentemperaturverlauf Meßvergleich 27.03.2008

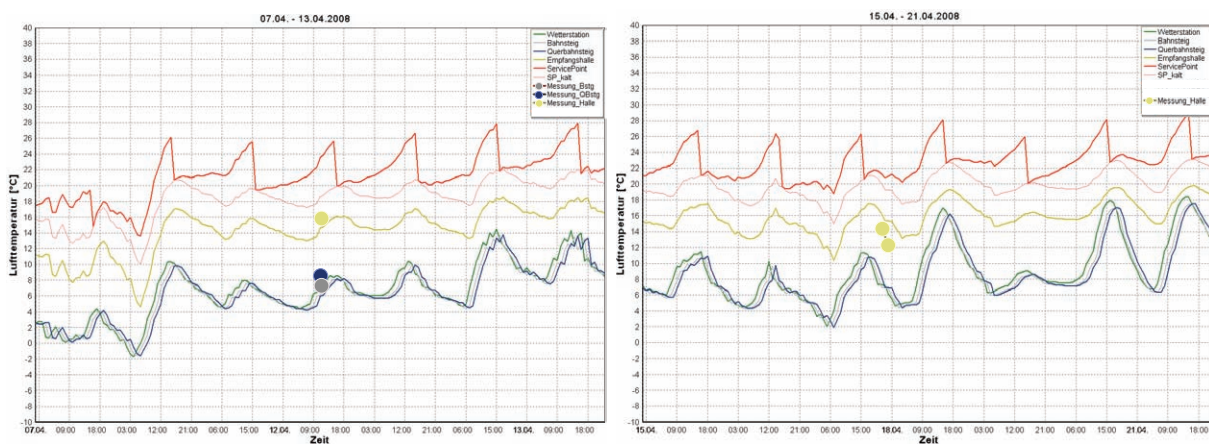


Abbildung 4.27: Wochentemperaturverlauf Meßvergleich 10.04. und 17.04.2008

fast ausschließlich negativ, das heißt der gemessene liegt über dem berechneten Wert:

Klimazone	Bahnsteig	Querbahnsteig	Empfangshalle	ServicePoint
Mittelwert Fehler	-2,30K	-4,84K	-2,15K	-5,00K
Standardabweichung	1,62K	2,50K	2,92K	4,33K

Die berechneten Werte für die Lufttemperatur auf dem Bahnsteig und in der Empfangshalle sind jeweils durchschnittlich 2,15-2,3K zu niedrig. Diese einseitige Verschiebung ist auffällig. Eine

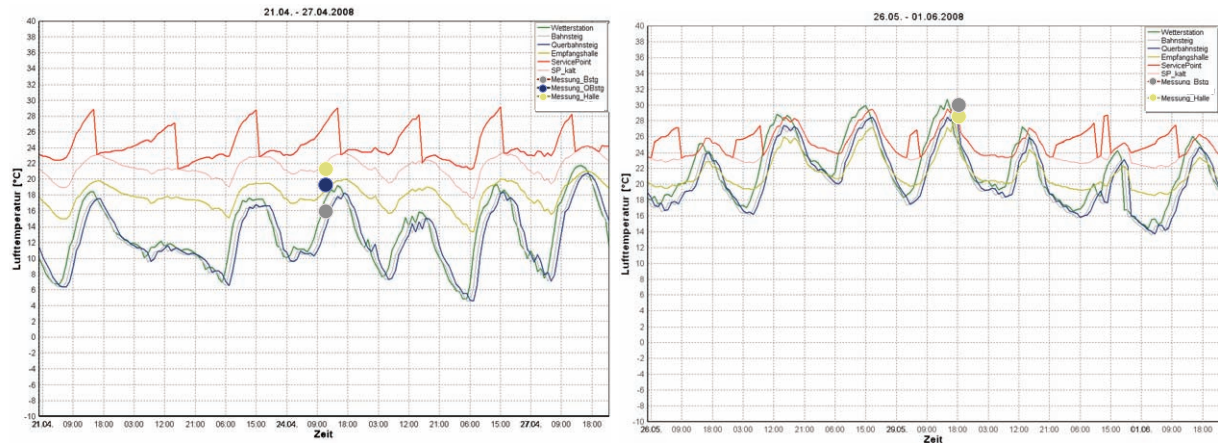


Abbildung 4.28: Wochentemperaturverlauf Meßvergleich 24.04. und 29.05.2008

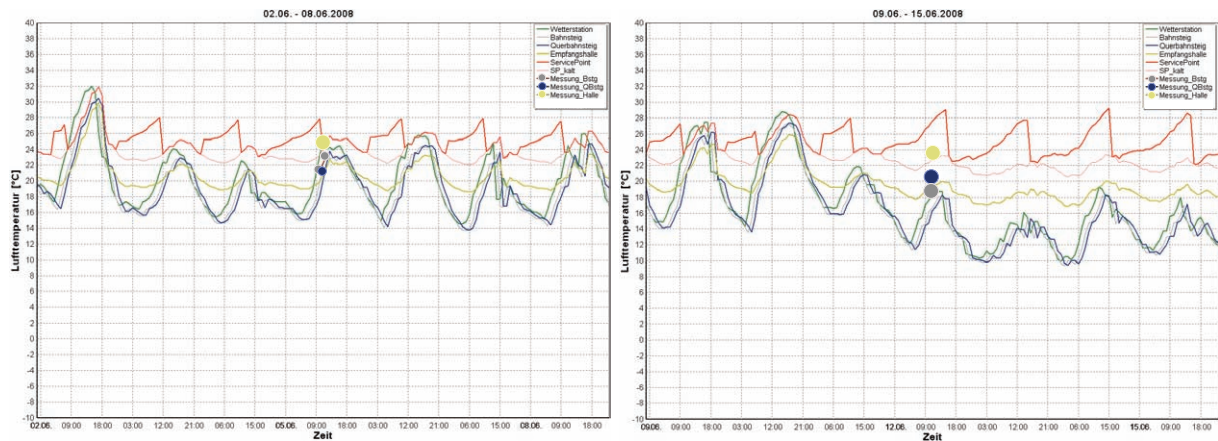


Abbildung 4.29: Wochentemperaturverlauf Meßvergleich 05.06. und 12.06.2008

mögliche Ursache wäre eine Veränderung des realen Systems oder der Auswahl der Zeitpunkte für die Stichproben. Andererseits könnte auch eine Änderung der Meßgerätschaft Ursache sein, da 2005 mit Dataloggern gemessen wurde, die auf über 2m Höhe deponiert waren, während die Meßgeräte in 2008 auf etwa 1,5m Höhe mit der Hand geführt wurden und der Wärmestrahlung der messenden Person ausgesetzt waren. Eine weitere Ursache liegt sicherlich auch darin, daß gegen Ende des Jahres 2008 und zu Beginn von 2009 Außentemperaturen von bis zu -10°C geherrscht haben. Derart niedrige Temperaturen kamen in dem Meßzeitraum von 2005 nicht vor, sodaß das Modell mit dieser extremen Kälte nicht umgehen kann. In der Tat sind die betragsmäßig größten Abweichungen auch bei diesen Stichproben zu verzeichnen.

Weiterhin interessant ist die Tatsache, daß die Verschiebung beim Bahnsteig und bei der Empfangshalle etwa gleich hoch, beim Querbahnsteig mit durchschnittlich 4,84K um mehr als das Doppelte bzw. 2,5K höher ausfällt. Dieses Phänomen liegt offensichtlich daran, daß der überdachte und einseitig geschlossene Querbahnsteig vor allem bei extremer Kälte seine klimatisch

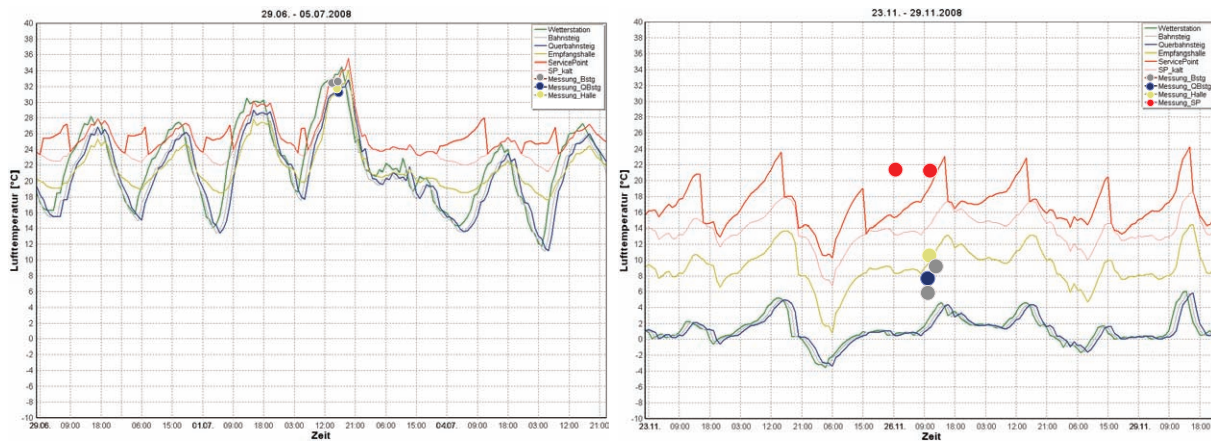


Abbildung 4.30: Wochentemperaturverlauf Meßvergleich 02.07. und 26.11.2008

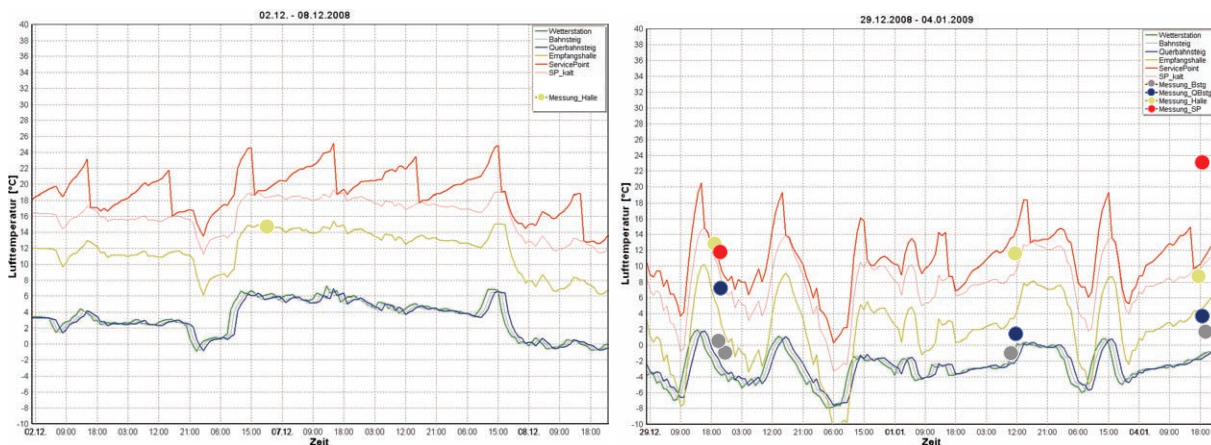


Abbildung 4.31: Wochentemperatur Meßvergleich 04./29.12.2008, 02./04.01.2009

schützende Wirkung entfaltet. Andererseits gab es während der Meßperiode 2008 auch eine baustellenbedingte Schließung des Querbahnsteiges in Richtung Norden, die in 2005 noch nicht vorhanden war. Somit läßt sich aus den Residuen schließen, daß eine Verglasung der Nordfassade des Querbahnsteigs durchschnittlich mehr als 2K, bei extrem niedrigen Temperaturen sogar bis zu 10K Temperaturpuffer bringen würde.

Beim ServicePoint ist aufgrund der unkontrollierbaren, manuellen Steuerung nicht klar nachvollziehbar, aus welchen Gründen sich die Abweichungen zwischen Messung und Modell ergeben. Die Untersuchungen in Abschnitt 4.4.1 haben gezeigt, daß selbst innerhalb der Meßperiode 2005 das Modell für den ServicePoint nicht annähernd gut angepaßt werden kann wie die anderen drei Klimazonenmodelle.

Abbildung 4.34 zeigt die berechneten Jahrestemperaturverläufe. Die Höchsttemperaturen im ServicePoint und vor allem die Tiefsttemperaturen der Empfangshalle zu Beginn des Jahres 2009 sind allerdings mit Vorsicht zu genießen. Solch extreme Temperaturen hat es im Frühjahr 2005

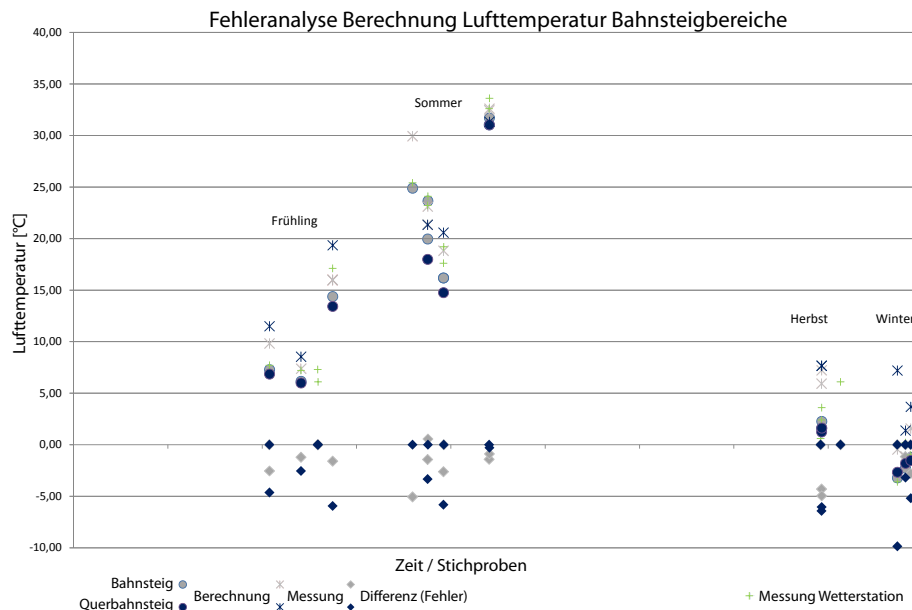


Abbildung 4.32: Fehleranalyse: Berechnete und gemessene Werte Lufttemperatur Außenbereiche

nicht gegeben, sodaß hier Werte hinsichtlich ihrer Temperatur extrapoliert werden. Bei Polynomen 3. Grades wie im Empfangshallenmodell kann dies dazu führen, daß unrealistische Werte berechnet werden.

Im nächsten Schritt werden die berechneten Temperaturwerte um den jeweiligen Mittelwert der oben diagnostizierten Fehler angehoben. Dadurch sind die Residuen wieder zentriert und haben den Erwartungswert 0. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.35 zu sehen.

Dadurch ergibt sich eine Verschiebung der Häufigkeiten, mit denen gewisse Temperaturintervalle in den verschiedenen Zonen erreicht werden, siehe Abbildung 4.36.

Für die vier Zonen gelten je nach Funktion verschiedene hinnehmbare Temperaturintervalle, die hier wie folgt angenommen werden:

Ort	$T_{min} \geq$	$T_{max} <$	Funktion	Verweildauer
Bahnsteig	0°C	30°C	Ein-, Aussteigen, Warten	bis 2 Minuten
Querbahnsteig	14°C	28°C	Warten, Kleingewerbe	bis 30 Min, 8 Std
Empfangshalle	16°C	26°C	Warten, Informationen	bis 30 Min, 8 Std
ServicePoint	18°C	24°C	Arbeitsplatz, Information	8 Stunden

Die Richtwerte für Bahnsteig, Querbahnsteig und Empfangshalle sollen während der Reisezeit von 5:00 bis 1:00 Uhr eingehalten werden, die Temperaturen für den ServicePoint lediglich während der Betriebszeit von 6:00 bis 20:00 Uhr. Aus diesen Forderungen ergeben sich die in Abbildung 4.37 dargestellten Häufigkeiten von akzeptablen klimatischen Situationen je Zone. Die Intervallgrenzen der prozentualen Häufigkeiten bei Bahnsteig, Querbahnsteig und Empfangshalle resultieren aus den oben berechneten Werten sowie deren Korrektur.

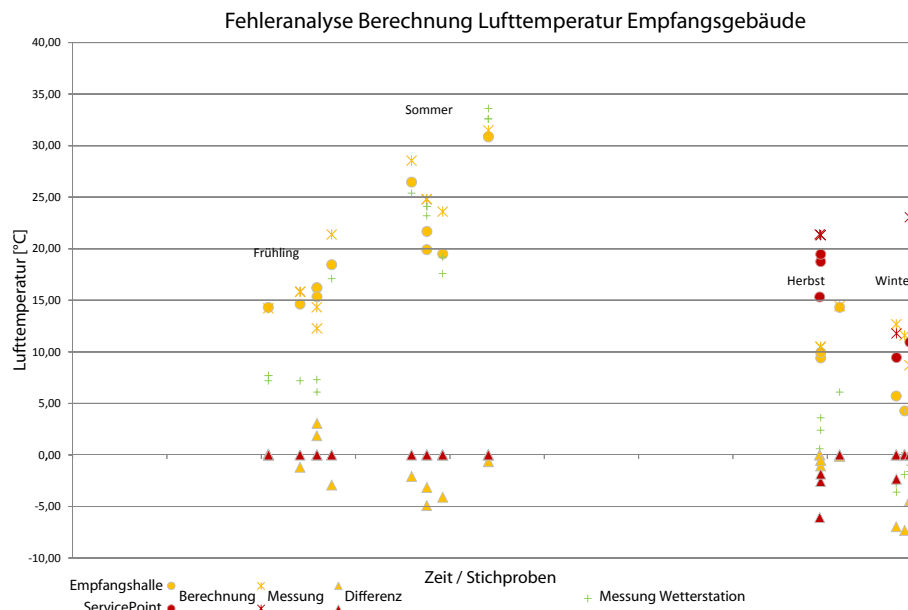


Abbildung 4.33: Fehleranalyse: Berechnete und gemessene Werte Lufttemperatur Innenräume

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für den ServicePoint fällt auf, daß es bei manueller Heizung häufig zur bereits in Abschnitt 4.4.1 diagnostizierten Überhitzung kommt. Der unbeheizte ServicePoint ist jedoch zu häufig zu kalt. Hier müßte eine antizipierende Steuerung der Heizung und eine dynamische Schließung der Hülle dafür sorgen, daß die akzeptablen Temperaturgrenzen nicht über- bzw. unterschritten werden.

Die Lufttemperatur am Bahnsteig erreicht sehr häufig die erforderlichen Zielwerte, was hauptsächlich daran liegt, daß die Anforderungen sehr weit gesteckt sind: Die Mindesttemperatur ist der Gefrierpunkt, was ein kurzes Warten auf das Einfahren eines Zuges ermöglicht. Sollte der

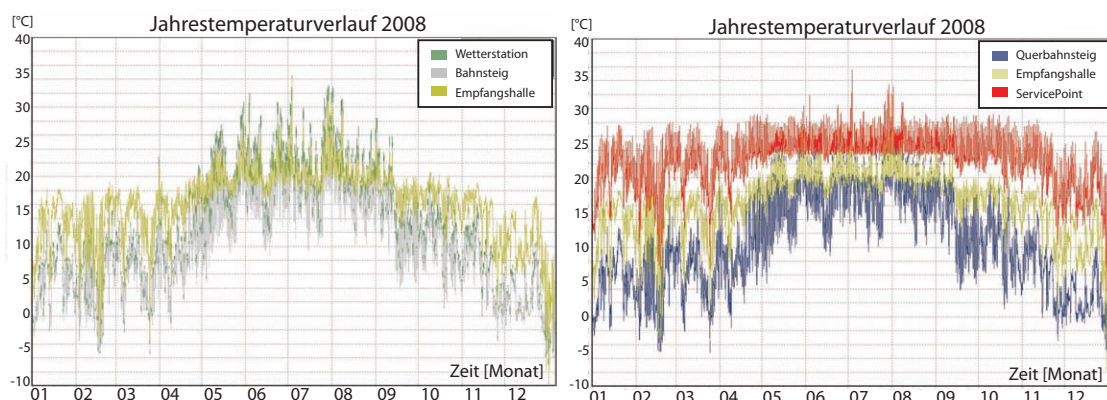


Abbildung 4.34: Berechneter Temperaturverlauf für Verkehrsstation und Empfangsgebäude

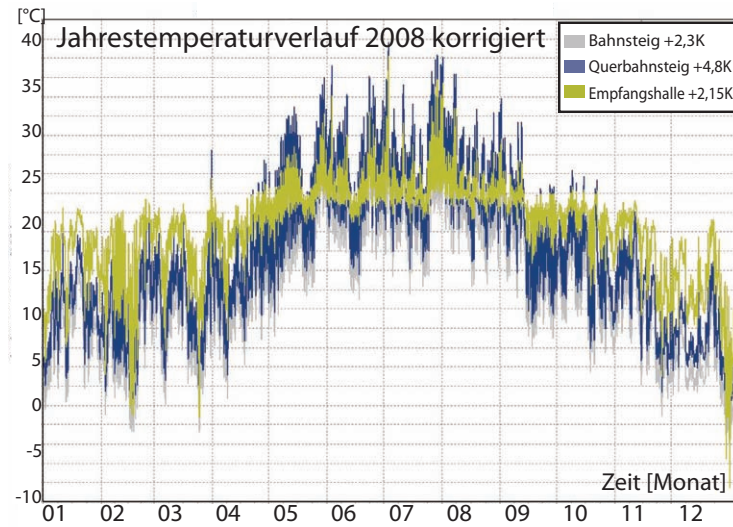


Abbildung 4.35: Korrektur des berechneten Jahrestemperaturverlaufs

Bahnsteig auch für längere Wartezeiten¹⁷ genutzt werden, so wäre er dazu völlig ungeeignet. Im Darmstädter Hauptbahnhof bietet sich der teilweise eingehauste Querbahnsteig, der als Brücke über den Bahnsteigen eine direkte Sichtbeziehung zu den Zügen zuläßt, als Sitzbereich für Wartezeiten bis zu 30 Minuten an. Nach den modellhaft berechneten Werten erreicht der Querbahnsteig allerdings nur in 34,5% aller Stunden während der täglichen Reisezeit eine akzeptable Lufttemperatur. Schließt man jedoch den Querbahnsteig, so wie im Bauzustand in den Jahren 2007 bis 2008, ist davon auszugehen, daß zumindest in der Hälfte aller Stunden die Minimalanforderungen erfüllt werden. Außerdem würde zusätzlich das Risiko für Zugluft gemindert, was in diesen Statistiken jedoch nicht modelliert wird. Die Empfangshalle erfüllt häufiger als der Querbahnsteig

¹⁷wie in Köln-Deutz, siehe Abschnitt 6.1.1

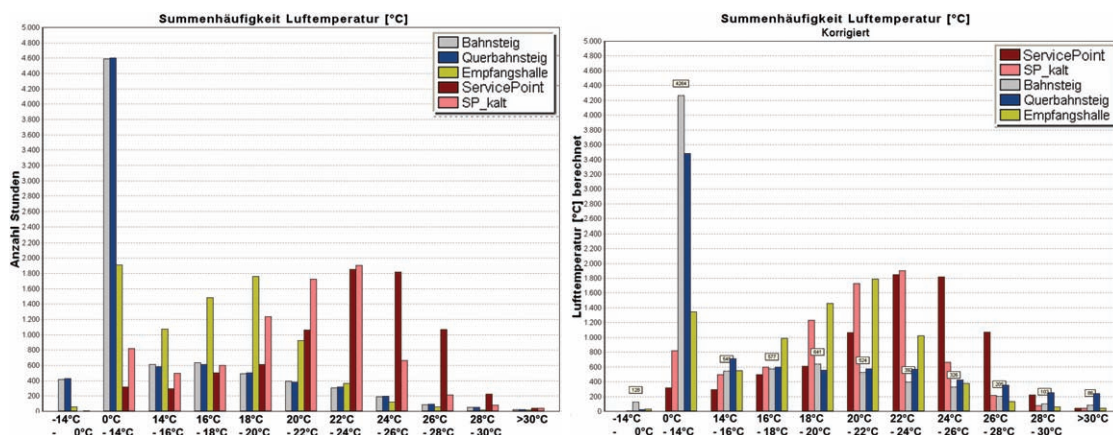


Abbildung 4.36: Summenhäufigkeit bestimmter Lufttemperaturen berechnet und korrigiert

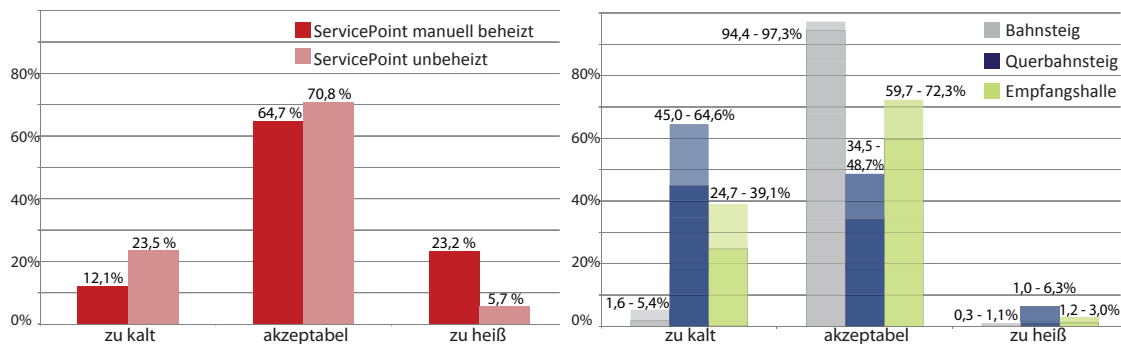


Abbildung 4.37: Häufigkeit der Stunden pro Jahr mit akzeptablen Lufttemperaturen

die Bedingungen für ein akzeptables Raumklima. Im tatsächlichen Bestand ist die Empfangshalle jedoch nicht so gut als Wartezone zu gebrauchen, da es einerseits keine Sitzgelegenheiten, andererseits keine Sichtbeziehung zu den Zügen gibt.

Die in den letzten Abschnitten dargestellte Argumentation läßt den Aspekt außer Betracht, daß sich die Erwartungen an die Lufttemperatur in einer Raumzone in Abhängigkeit des gleitenden Temperaturdurchschnitts der Außenluft ändern. Maßgeblich ist laut DIN EN 15251 ein Zeitraum von einer Woche. Ein Grund für die Änderung in der Erwartungshaltung ist beispielsweise die Anpassungsfähigkeit durch Kleidungswechsel. Die in der Norm genannten Behaglichkeitsintervalle beziehen sich jedoch auf Arbeitsplätze und sind in diesem Kontext nur für den ServicePoint und mit Einschränkung für die Empfangshalle anwendbar. Die in der DIN EN 15251 vorgestellten Diagramme geben jedoch einen guten Eindruck darüber, welche Bandbreite die Lufttemperaturen in einer Zone bei gegebenen durchschnittlichen Außentemperaturen der jeweils zurückliegenden Woche einnehmen. Die Wertepaare in den Abbildungen 4.38 und 4.39 sind durch farbige Punkte gekennzeichnet: schwarze Punkte bedeuten die höchste, grüne die zweithöchste und gelbe die niedrigste Komfortstufe. Alle drei Stufen sind jedoch im Bahnhofsbereich akzeptabel. Die roten Punkte bedeuten inakzeptable Klimabedingungen.

4.4.3 Räumlich klimatischer Zusammenhang der Zonen

Ausschlaggebend für das Komfortempfinden in einer Gebäudezone ist nicht nur das Temperaturniveau selbst, sondern auch dessen Veränderung. Eine ständige Veränderung der Umgebungstemperatur ist gerade in Bahnhöfen gegeben, da sich die Reisenden durch verschiedene Klimazonen bewegen und somit einem ständigen Wechsel der sie umgebenden Lufttemperatur ausgesetzt sind. Abbildung 4.40 zeigt die verschiedenen Lufttemperaturen, denen ein Reisender bei einem typischen Gang durch das Darmstädter Bahnhofsgelände ausgesetzt ist¹⁸. Bei der Beurteilung des zu erwartenden thermischen Komforterlebnisses sollte berücksichtigt werden, daß die Kleidung der Personen der Temperaturen im Außenraum, das heißt *Vorplatz* angemessen sein wird. Die Temperaturschwankungen, denen die Reisenden auf ihrem Weg durch den Bahnhof ausgesetzt sind, sind im Sommer am geringsten und im Winter am höchsten. Im Sommer sind die Temperaturen im

¹⁸Vernachlässigt wird in dieser Darstellung jedoch die unterschiedliche Verweildauer in den jeweiligen Zonen

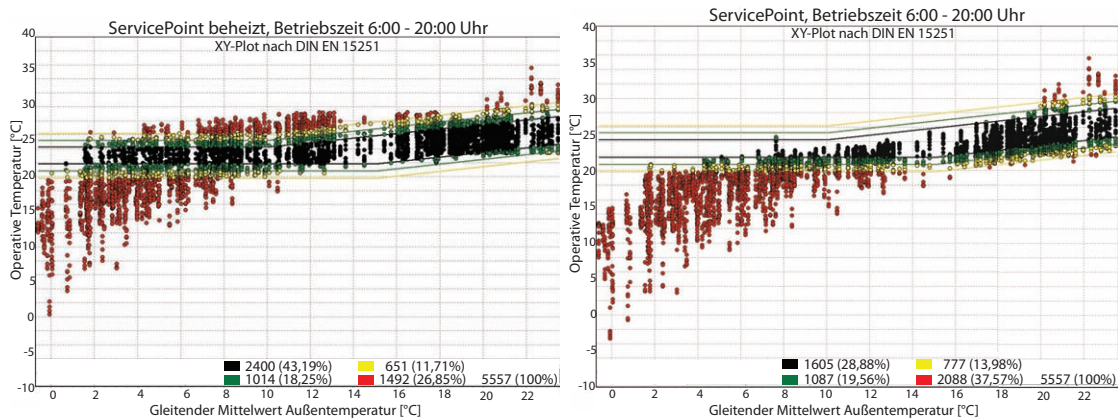


Abbildung 4.38: Darstellung der Häufigkeit des Eintretens von Komfortzuständen nach DIN EN 15251 im ServicePoint

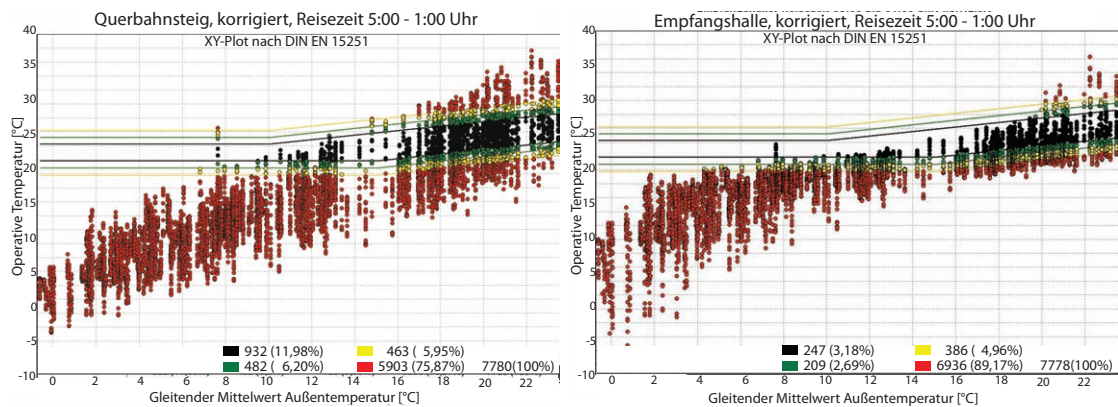


Abbildung 4.39: Darstellung der Häufigkeit des Eintretens von Komfortzuständen am Querbahnsteig und in der Empfangshalle

gesamten Bahnhof trotz massiver Bauweise recht hoch. Im Winter ist davon auszugehen, daß Besucher des Zeitschriftenladens, der Gastronomie und Reisende mit dem Zug schnell zu schwitzen beginnen. Eine Verbesserung des thermischen Komforts müßte so aussehen, daß die Reisenden auf ihrem Weg durch den Bahnhof eine monoton steigende oder monoton sinkende Lufttemperatur erfahren.

Die durchschnittlichen Temperaturen¹⁹ in den einzelnen Zonen werden in den Abbildungen 4.41 und 4.42 farbige dargestellt.

¹⁹ gemessen tagsüber zu verschiedenen Uhrzeiten an verschiedenen Tagen

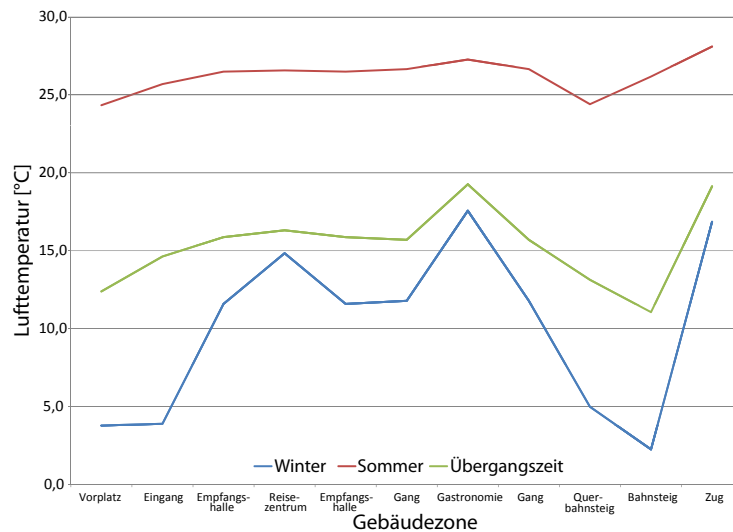


Abbildung 4.40: Lufttemperaturen bei einem typischen Gang durch den Darmstädter Hbf

4.4.4 Entwicklung eines differenziert räumlichen Modells

Im Folgenden werden die räumlich differenzierten aber stichprobenhaften Messungen aus dem Jahr 2008 diskutiert und analysiert. Zunächst wird ein durchschnittlicher Zustand für jeweils die Hitze-, Kälte- und Übergangsperiode im Darmstädter Hbf gezeichnet. Danach werden für alle gemessenen Zonen, die nicht Gegenstand der Dauermessung in 2005 waren, die besonderen Beobachtungen bei den Messungen, die Stärke des Einflusses der Außentemperatur und reziprok

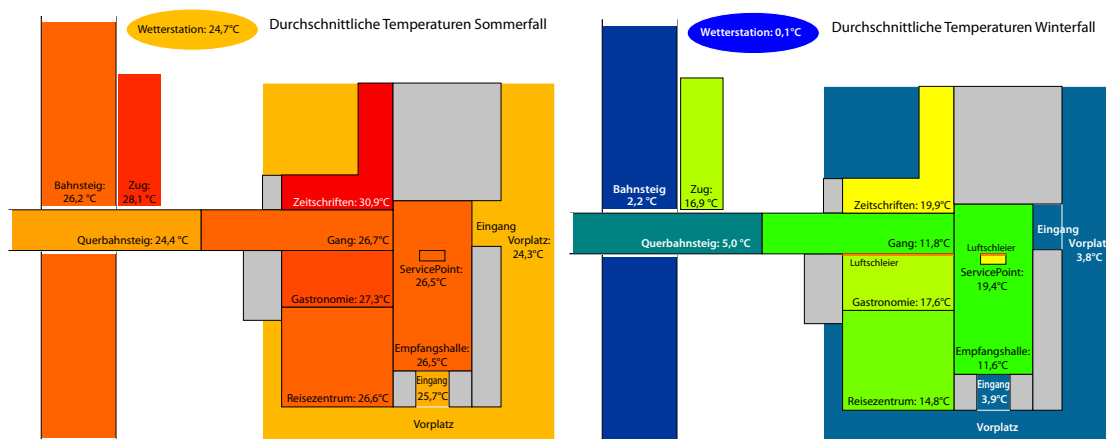


Abbildung 4.41: Räumlich klimatische Situation an einem typischen Sommer- bzw. Wintertag

dazu die thermische *Pufferwirkung*, die *Basistemperatur*²⁰, die Beziehung zu den *Nachbarzonen* sowie *Güte des Regressionsmodells* betrachtet.

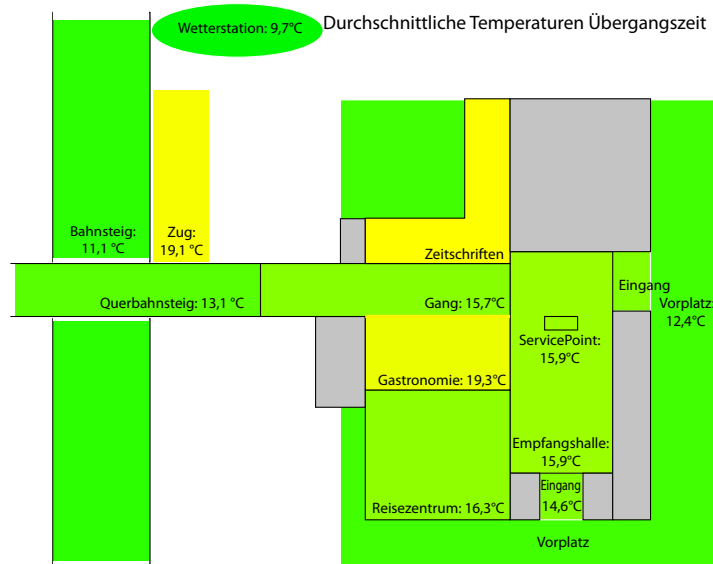


Abbildung 4.42: Räumlich klimatische Situation an einem typischen Tag in der Übergangszeit

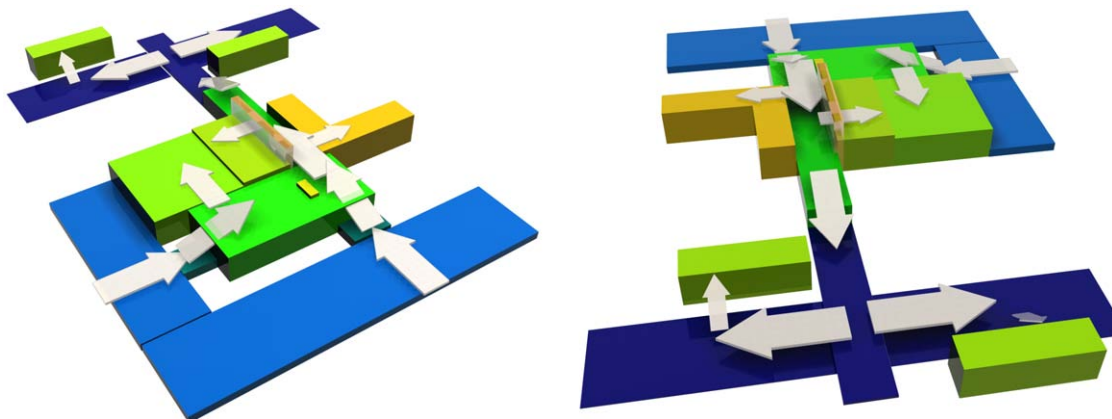


Abbildung 4.43: Thermischen Unabhängigkeit der Gebäudezonen im Darmstädter Hbf

Abbildung 4.43 zeigt schematisch die thermische Pufferwirkung der gemessenen Zonen. Je *höher* eine Zone dargestellt ist, desto unabhängiger ist sie von der Außentemperatur an der Wetterstation. Die jeweilige Farbe repräsentiert die Höhe der Basistemperatur der Zone. Die Größe der Pfeile zeigt maßstäblich die gegenseitige thermische Abhängigkeit benachbarter Zonen.

²⁰Die Basistemperatur ist die konstante Temperaturverschiebung nach oben, die in einer Gebäudezone herrscht, selbst wenn außen 0°C gemessen werden

Zug

Der Übergang vom Bahnsteig in den Zug und umgekehrt stellt hinsichtlich des thermischen Komforts eine besonders kritische Schnittstelle dar. In beiden Klimazonen halten sich die Reisenden in der Regel auf, ohne sich zu bewegen. Die Kleidung richtet sich nach dem Klima auf dem Bahnsteig, kann aber bei längeren Zugfahrten angepasst werden. Für die stichprobenhaften Messungen wurden verschiedene Zugtypen wie S-Bahn, Regionalbahn und Fernverkehr in der 1. und 2. Wagenklasse ausprobiert. Die Fernzüge sind in der Regel klimatisiert und können im Sommer im Vergleich zu der Außentemperatur zu kalt sein. Bei doppelstöckigen Regionalbahnen beträgt die Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Stockwerk bis zu 4K. Bei Fahrten in S-Bahnen, die etwa alle zwei Minuten für einige Sekunden halten und ihre Türen öffnen, schwanken die Innenraumtemperaturen sehr stark. Im Winter, bei Außentemperaturen um 8°C, schwankt die Innentemperatur in der S-Bahn während der Fahrt von Darmstadt nach Frankfurt zwischen 13,8°C und 18°C.

Durch die Regressionsanalyse der stichprobenhaften Messungen lassen sich folgende Zusammenhänge erkennen:

- 45% der Innenraumtemperatur im Zug lassen sich durch die Außentemperatur in der Meßstation erklären
- 55% der Innenraumtemperatur im Zug ist unabhängig von der Außentemperatur und wird durch die Insassen, thermische Trägheit des Materials und Heizungen beeinflusst
- Das Niveau der *Basistemperatur* beträgt etwa 16°C

Das beste, quadratische Regressionsmodell der Innenraumtemperatur Zug in Abhängigkeit der Temperatur an der Wetterstation hat ein R^2 von 0,89. Noch besser ist das Modell der Innenraumtemperatur Zug in Abhängigkeit der Bahnsteigtemperatur mit einem R^2 von 0,97, wobei der konstante und der quadratische Term die höchste Signifikanz haben:

$$T_{Zug,t} = 16,6 + 0,011T_{BS,t} + 0,014T_{BS,t}^2 \quad (4.8)$$

Gang

Der Gang hat eine ähnliche Verteilungsfunktion wie die Empfangshalle, besitzt aber ein deutlich geringeres Raumvolumen. Nach der Regressionsanalyse lassen sich

- 61% der Temperatur im Gang durch die Außentemperatur an der Wetterstation erklären
- 39% unabhängig auf die Abwärme der Gastronomie, der Beleuchtung, der Personen und der thermischen Trägheit der Bauteile zurückführen
- eine Basistemperatur von 10,7°C ermitteln

Das angepaßte R^2 des Regressionsmodells zwischen Gang und Wetterstation beträgt 0,93, erstaunlich hoch. Die Regressionsanalyse zwischen Gangtemperatur und Hallentemperatur zeigt, daß die Temperatur im Gang im Durchschnitt 1K unterhalb der in der Halle liegt, die Schwankungen jedoch um 1,5% stärker sind als in der Halle ($R^2 = 0,93$):

$$T_{Gang,t} = -1 + 1,015T_{Halle,t} \quad (4.9)$$

Die Konstante $\beta_0 = -1$ hat eine geringere Signifikanz als der Faktor β_1 von $T_{Halle,t}$.

Die thermische Abhängigkeit zwischen Querbahnsteig und Gang sieht wie folgt aus ($R^2 = 0,97$):

$$T_{Gang,t} = 6,6 + 0,78T_{QBstg,t} \quad (4.10)$$

Die Temperatur im Gang liegt durchschnittlich 6,6K oberhalb der über dem Querbahnsteig, die Schwankungen auf dem Querbahnsteig sind deutlich stärker als im Gang.

Eingang

Die Eingangsbereiche verbinden den Vorplatz mit der Empfangshalle. Außen befinden sich Dächer über den Eingängen, auf der Innenseite werden sie von massiven Pfeilern flankiert und bilden dadurch kleine, in zwei Richtungen geschlossene Räume, in deren Mitte sich die Außenwand mit automatischen Türen befindet.

Die Regressionsanalyse zwischen den Temperaturen an der Wetterstation und den Eingangsbereichen bringt folgende Ergebnisse ($R^2 = 0,94$):

- 82% der Temperatur im Eingangsbereich lassen sich durch die Außentemperatur an der Wetterstation erklären
- 18% sind unabhängig und auf die Abwärme aus der Halle und der thermischen Trägheit der Bauteile zurückführen
- die Basistemperatur beträgt $5,4^\circ\text{C}$

Die Lufttemperatur im Eingangsbereich liegt durchschnittlich 2,4K über der Temperatur auf dem Vorplatz und schwingt um 7% gedämpft:

$$T_{Eingang,t} = 2,3 + 0,93T_{Vorplatz,t} \quad (4.11)$$

Gegenüber der Empfangshalle jedoch liegt die Lufttemperatur durchschnittlich 6,3K niedriger, sie schwingt um 20% stärker:

$$T_{Eingang,t} = -6,3 + 1,2T_{Halle,t} \quad (4.12)$$

Ein Modell, das die Temperatur im Eingangsbereich sowohl an der Vorplatz- als auch an der Hallentemperatur regrediert, hat das höchste $R^2 = 0,95$. Allerdings ist der Einfluß der Hallentemperatur auf den Eingangsbereich gegenüber dem Einfluß der Vorplatztemperatur nicht signifikant.

Vorplatz

Der Vorplatz gehört wie der Bahnsteigbereich zum Außenbereich, ist jedoch nicht überdacht. Das Regressionsmodell zwischen Wetterstation und Vorplatz zeigt eine außerordentlich hohe Korrelation ($R^2 = 0,95$):

$$T_{Vorplatz,t} = 3,3 + 0,85T_{WS,t} \quad (4.13)$$

Offensichtlich erzeugen der Boden und die umgebenden Gebäude eine thermische Pufferwirkung für den Vorplatz gegenüber der Wetterstation hoch in der Luft.

Bahnsteigbereich

Die Bahnsteige in Darmstadt gehören dem Außenbereich an, sind aber teilweise überdacht. Bei den stichprobenhaften Messungen auf den Bahnsteigen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Die Temperatur unter dem Dach ist im Winter²¹ bis zu 2K höher als unter freiem Himmel
- Die einfahrenden Züge strahlen bzw. absorbieren in der Hitze- und Kälteperiode aufgrund extremer Oberflächentemperaturen
- Die Metallbänke nehmen ebenfalls die Temperatur der Umgebungsluft an und leiten sie gut an die darauf sitzenden Wartenden weiter. Das kann im Winter extrem kalt sein.
- Der Luftzug kommt bei Nord- oder Südwind voll zum Tragen, bei Ost- und Westwind bieten die Bahnhofsgebäude und Böschungen einen gewissen Schutz

Gastronomie

Der Gastronomiebereich grenzt an den Gang zwischen Empfangshalle und Querbahnsteig. Im Winter und in der Übergangszeit trennt eine Luftschleieranlage die beiden Klimazonen. Die senkrechte Luftströmung hat auf Kopfhöhe eine Geschwindigkeit von 2,5 bis 3,0 m/s. Die Lufttemperatur beträgt 25 bis 30 °C. Gerade im Winter erzeugt die extrem warme Luft zwischen Gang und Gastronomie einen regelrechten Hitzeschock. Abgesehen von der Luftschleieranlage sind die beiden Zonen Gastronomie und Gang ganztägig zueinander offen

Durch diesen künstlichen Eingriff in das Raumklimagefüge ist die Korrelation zwischen Außentemperatur und Lufttemperatur in der Gastronomie relativ gering: $R^2 = 0,66$

Das Regressionsmodell zeigt, daß

- 36% der Temperatur im Gastronomiebereich durch die Außentemperatur an der Wetterstation erklären werden
- 64% unabhängig und auf die Luftschleieranlage, die Abwärme aus den Backöfen und die thermische Trägheit der Bauteile zurückzuführen sind
- die Basistemperatur 17,2°C beträgt

Das Regressionsmodell mit dem Gang ist ähnlich dem Regressionsmodell mit der Empfangshalle und hat bei einem $R^2 = 0,78$ folgende Ausprägung:

$$T_{Gastro,t} = 10,1 + 0,63T_{Gang,t} \quad (4.14)$$

²¹tagsüber und nachts

Reisezentrum

Der Zugang zum Reisezentrum besitzt ebenfalls eine Luftschleieranlage. Da zusätzlich eine automatische Schiebetür die beiden Zonen Reisezentrum und Empfangshalle trennt, ist die Luftschleieranlage selbst im Winter meistens außer Betrieb. Die Lufttemperatur der Luftschleieranlage liegt deutlich unter der des Gastronomiebereiches.

Das Reisezentrum in Darmstadt besitzt im Gegensatz zum Frankfurter Reisezentrum nur einen Zugang, sodaß sich im Innern kein Luftzug bildet.

Die Lufttemperatur im Reisezentrum besitzt eine hohe Korrelation zur Außenlufttemperatur ($R^2 = 0,95$), allerdings sind nur 44% der Lufttemperatur auf die Temperatur außen zurückzuführen. 56% sind auf Beleuchtung, Personen, Bürogeräte und die thermische Trägheit der Wände, des Bodens und der Decke zurückzuführen. Die Basistemperatur beträgt $14,9^\circ\text{C}$. Die Korrelation gegenüber der Temperatur in der Empfangshalle ist extrem hoch ($R^2 > 0,99$), das Regressionsmodell sieht wie folgt aus:

$$T_{RZ,t} = 6,4 + 0,75T_{Halle,t} \quad (4.15)$$

Zeitschriften

Der Zeitschriftenladen besitzt einen L-förmigen Grundriß. In der Flanke parallel zum Gang befinden sich die Zeitschriften, in der anderen Bücher. Aufgrund der starken Beleuchtung²² und der hohen Personendichte ist es im Zeitschriftenladen sehr warm, im Sommer sogar unangenehm heiß. Die Luftschleieranlage ist kaum in Betrieb, obgleich der Zugang während der Betriebszeit durchgehend geöffnet ist. Besonders heiß ist die Raumflanke mit den Büchern, die im Sommer weder meß- noch spürbar mit einem mobilen Klimagerät gekühlt wird.

Die Lufttemperaturen an der Wetterstation und im Zeitschriftenladen sind mit $R^2 = 0,86$ korreliert. Dabei sind nur 38% der Lufttemperatur im Laden auf die Temperatur um den Außenraum zurückzuführen, 62% werden durch innere Wärmequellen bestimmt. Die Basistemperatur beträgt $20,3^\circ\text{C}$ und ist in keinem öffentlich zugänglichen Raum im Bahnhof höher. Die Temperaturen im Laden und im Gang sind überraschend schwach korreliert ($R^2 = 0,80$), jedoch besteht ein starker Zusammenhang zwischen den Temperaturen im Zeitschriftenladen und der Empfangshalle mit $R^2 = 0,94$:

$$T_{Zeitschriften,t} = 14,4 + 0,58T_{Halle,t} \quad (4.16)$$

4.4.5 Prüfung der Ergebnisse der Thermischen Simulation

Die Prüfung der Ergebnisse der thermischen Simulation erfolgt beispielhaft durch einen Vergleich der Temperaturhäufigkeiten um 12 Uhr mittags und um Mitternacht während eines Jahres in der Empfangshalle.

²²nirgendwo sonst im gesamten Bahnhof herrscht eine derart hohe Beleuchtungsstärke von 1000 bis 1500 lux

Die Durchschnittstemperatur liegt in beiden Fällen bei 16,3°C. Allerdings liefert die Simulation eine andere Verteilung auf die Temperaturintervalle als das auf der Messung basierende Regressionsmodell. Während die Simulation ein stark von Charakteristiken der Normalverteilung geprägtes Bild liefert und vor allem kühle Hallentemperaturen zwischen 14°C und 18°C berechnet, sind die Temperaturhäufigkeiten in dem auf Messungen basierenden Modell weiter gestreut. Die Temperaturen mittags kumulieren zwischen 18°C und 22°C, die nächtlichen Temperaturen erreichen häufig Werte unter 14°C. Eine mögliche Erklärung ist die Tatsache, daß die Umgebungstemperaturen für die Simulationen auf Testreferenzjahren beruhen, wohingegen das Jahr 2008, welches dem Regressionsmodell unterliegt, ungewöhnlich extreme Temperaturen aufwies. Eine weitere Erklärung könnte darin liegen, daß die Speichermassen des Empfangsgebäudes nicht so stark zwischen Tag und Nacht puffern wie in der Simulation angenommen.

4.4.6 Prüfung der Randbedingungen der Strömungssimulation

Für die Strömungssimulationen der Empfangshalle des Darmstädter Hauptbahnhofs sowie des Bahnsteigbereich in Köln Deutz wurden sowohl moderate als auch extreme Wetterverhältnisse der Kälteperiode angenommen. Die niedrigste Außentemperatur im Vorplatz- bzw. Bahnsteigbereich während der Betriebszeit wurde mit -5°C angenommen, die maximale Windgeschwindigkeit mit 5m/s. Nach dem auf den Messungen in Darmstadt basierenden Regressionsmodell gab es in einem Jahr an 18 Stunden während der Betriebszeit beziehungsweise 23 Stunden während der Verkehrszeit Außenlufttemperaturen von unter -5°C. Das sind jeweils 0,3% der Betriebs- bzw. Verkehrsstunden. Die für den Extremfall angenommenen Temperaturen sind zwar selten, kommen aber durchaus während der Verkehrszeit vor.

Die Luftgeschwindigkeiten wurden sowohl an der Wetterstation 2005 und 2008 als auch stichprobenhaft 2008 im Bahnhof gemessen. Die Messung der Windgeschwindigkeiten auf dem Vorplatz des Bahnhofs und im Bahnsteigbereich zeigen maximal die in der Simulation angenommenen 5m/s, meistens jedoch deutlich weniger. Die vergleichende Analyse der kontinuierlich an der Wetterstation gemessenen Windgeschwindigkeiten und die stichprobenhaft auf dem Vorplatz und den Bahnsteigen gemessenen Werte zeigen, wie häufig mit der in der Strömungssimulation angenommenen Windgeschwindigkeit von 5m/s gerechnet werden kann, und wie diese hohen Windgeschwindigkeiten zeitlich mit Temperaturen von -5°C oder kälter zusammenfallen.

Abbildung 4.45 zeigt, welche extremen Windgeschwindigkeiten im Bereich der Wetterstation in 2008 auftraten, und wie hoch die Umgebungstemperaturen zu dem Zeitpunkt waren. Schwarz ist der saisonale Trend der Luftgeschwindigkeit, orange der saisonale Trend der Lufttemperatur eingetragen. Die maximalen Windgeschwindigkeiten treten weder bei extrem hohen noch extrem niedrigen Temperaturen auf, sondern in klimatischen Wechselphasen.

In Abbildung 4.46 werden die Messungen an der Wetterstation, die Messungen am Bahnhof sowie die Windböen, wie sie am Boden kurzzeitig auftreten, dargestellt. Bis auf wenige Ausnahmen ist die Luftgeschwindigkeit an der Wetterstation immer größer als am Boden. Die Messungen zeigen aber auch, daß Windgeschwindigkeiten sehr volatil sind, das heißt sie verändern sich schnell im Laufe weniger Minuten und Stunden.

Um die Häufigkeit der hohen Luftgeschwindigkeiten in Bodennähe berechnen zu können, soll der

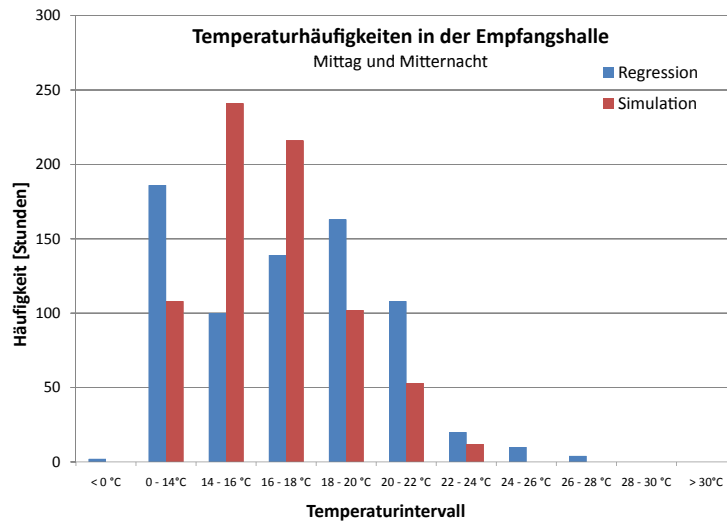


Abbildung 4.44: Vergleich der Temperatursummenhäufigkeiten Empfangshalle Regressionsmodell der Messungen 2005/2008 und Simulation

genaue Zusammenhang zwischen den Luftgeschwindigkeiten an der Wetterstation und am Boden mit Hilfe einer Regressionsanalyse bestimmt werden.

Die lineare Regressionsberechnung ergibt, daß zwischen den Geschwindigkeiten an der Wetterstation und der normalen Luftgeschwindigkeit am Boden keine meßbare Korrelation besteht, also auch kein lineares Modell entwickelt werden kann. Zwischen den Meßwerten der Wetterstation und den am Boden gemessenen Böen gibt es jedoch einen schwachen Zusammenhang ($R^2 = 0,3$). Danach beträgt die Luftgeschwindigkeit der Bö am Boden durchschnittlich 64% der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation. Unter dieser Voraussetzung würde die Annahme einer dauerhaften Luftgeschwindigkeit von 5m/s in Bodennähe nie eintreten. Windböen in Bodennähe mit 5m/s, die bei den stichprobenhaften Erhebungen tatsächlich gemessen wurden, würden in 172 Stunden während der Betriebszeit bzw. 213 Stunden während der Reisezeit auftreten, das entspricht 3,1% der jährlichen Betriebs- bzw. 2,7% der Reisezeit. Allerdings fallen diese Stunden mit hohen Bodenwindgeschwindigkeiten nicht zusammen mit Temperaturen unter 0°C.

Die stichprobenhaften Messungen im Bahnhof zeigen, daß die internen Luftgeschwindigkeiten in der Realität geringer sind als in der Simulation, selbst wenn draußen starker Wind herrscht und die Türen offen stehen.

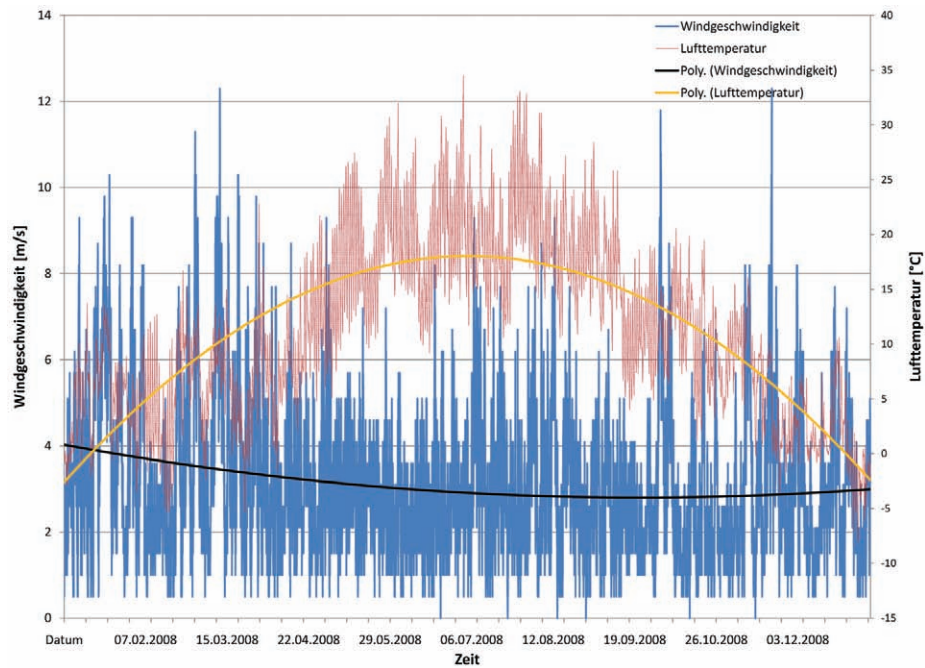


Abbildung 4.45: Verlauf von Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur in 2008 inkl. Trend

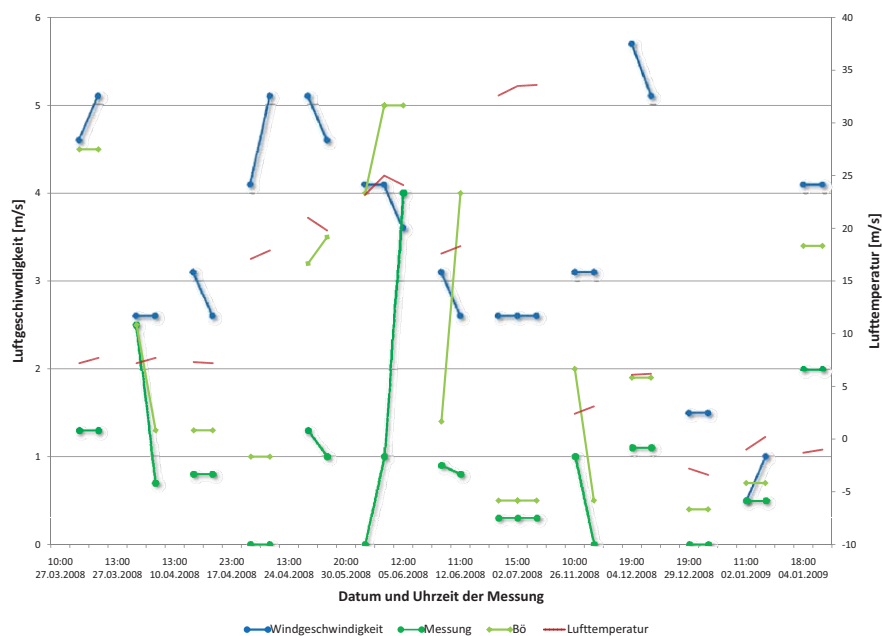


Abbildung 4.46: Vergleich der stichprobenhaften Messungen am Boden mit den Messungen an der Wetterstation

4.5 Fazit und Beurteilung der Ergebnisse

Mit Hilfe der in diesem Kapitel beschriebenen Werkzeugen der linearen Regressionsanalyse lassen sich räumliche und zeitliche Zusammenhänge zwischen den thermischen Zuständen in klimatischen Gebäudezonen quantifizieren. Dadurch lassen sich

- Planungen von optimalen Raumfolgen und Wegen für Reisende durch Bahnhöfe
- Kurzfristprognosen für zukünftige Temperaturen während des Betriebes
- Steuerungsstrategien für bestimmte funktionale Zonen
- die Pufferwirkungen verschiedener Raumgrenzen
- die Eintrittswahrscheinlichkeit extremer thermischer Zustände in Zonen

bestimmen, quantifizieren und beurteilen.

Diese Analyse behandelt allerdings stellvertretend den Darmstädter Hauptbahnhof und fokussiert neben allen relevanten thermodynamischen Größen vor allem auf die Lufttemperatur. Zur Bestimmung der thermischen Gesetzmäßigkeiten in anderen Bahnhöfen mit weiteren thermodynamischen Größen wären sicherlich weitere Untersuchungen dieser Art notwendig. Allerdings zeigt diese Untersuchung, daß durch den richtigen Einsatz relativ einfacher statistischer Mittel bereits sehr stabile und hilfreiche Ergebnisse zu erzielen sind. In Bezug auf die vielen kleinen Bahnhöfe mit jeweils ähnlichen baulichen Strukturen würde es ausreichen, die Messungen und darauf basierenden Regressionsanalysen nur für eine kleine Auswahl an Referenzbahnhöfen zu unternehmen, und diese Ergebnisse auf die übrigen Bahnhöfe derselben Kategorie zu extrapolieren. Zur Berechnung von kurzfristigen Prognosen müßten dann nur wenige lokale Eingangsgrößen wie Lufttemperaturen an lokalen Wetterstationen oder die Ausrichtung des jeweiligen Bahnhofs berücksichtigt werden. Für die Analyse und Modellierung größerer Bahnhöfe und architektonischen Unikate wären individuelle Erhebungen und Regressionsberechnungen nötig, die sich in ihre Form und Parameter, z.B. bezüglich der *Time lags* an den Ergebnissen dieser Studie orientieren könnten. Sollten weitere thermodynamische Größen wie Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Wärmestrahlung sowie Richtung von Wind und Strahlung ebenso profund analysiert werden wie in dieser Untersuchung die Lufttemperatur, wäre eine hohe Anzahl entsprechender Messungen aus dem jeweiligen Bahnhof nötig.

Die hier gezeigte Analyse liefert keine Hinweise bezüglich dem Nutzen der dynamischen Änderung von Raumgrenzen, wie beispielsweise durch automatische Türen oder schaltbare Luftschleieranlagen. Der Grund hierfür liegt darin, daß keine Informationen über die zeitliche Abfolge entsprechender Zustände vorliegen. Für eine weitergehende Analyse wäre es daher hilfreich, wenn auch solche Betriebsinformationen vorlägen.

Für quantitative Aussagen über das Komfortempfinden der Personen, die sich durch einen Bahnhof bewegen, müßten Informationen über das Kundenverhalten vorliegen, das heißt, wie viele Personen sich wann und wo bewegen oder wie lange aufhalten. Darüber hinaus wären Komfortbefragungen im Stile der Untersuchung von Fanger nötig, die quantitativ darüber Aufschluß geben, wie stark das Komfortempfinden von Personen in nichtklimatisierten Räumen mit stark veränderlichen thermischen Umgebungszuständen ist.

5 Gesamtsystem Bahnhof

5.1 Modellierung Wirkungsgefüge

Zunächst sollen in einem qualitativen, groben Modell die Wechselwirkungen in Bahnhöfen untersucht werden. Grundlage der Vorgehensweise ist das von Frederic Vester vorgeschlagene Sensitivitätsmodell, siehe Abschnitt 3.6.2 auf Seite 91. Diese Modelle dienen *nicht* dazu, physikalische, technische, finanzielle oder psychologische Größen quantitativ zu berechnen. Es geht viel mehr darum, Wechselwirkungen und indirekte Mechanismen und Zusammenhänge eines Systems zu erkennen. Im ersten Schritt werden die wichtigsten Variablen definiert und bewertet. Diesen Teil des Modellierungsverfahrens haben Studierende des Seminars „Wohlfühlbahnhof“ an der TUD Darmstadt erarbeitet. Die Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

5.1.1 Variablen

Die Abstraktion auf ein Modell bedeutet die Reduzierung aller in der Realität möglichen Zustände auf ein überschaubares Mindestmaß an Variablen und deren Abhängigkeiten. Die Simulation berücksichtigt nur Wirkungen, die die Modellierer und Programmierer vorher berücksichtigen. Insofern ist die Auswahl der Variablen entscheidend für das Ergebnis der Simulation. Zunächst soll nur das qualitative Verhalten des Modells untersucht werden. Dazu reicht es, abstrakte Variablen mit einem normierten Wertebereich einzusetzen, also keine physikalischen oder wirtschaftlichen Größen.

Bei der Wahl der Variablen haben sich die Bereiche

- Klima
- Verkehr / Nutzer
- Gebäude / Architektur
- Komfort
- Kosten
- Technik

herauskristallisiert.

Diese wurden von sieben Seminargruppen an der TU Darmstadt anhand des Vesterschen Kriterienkataloges auf ihre Wichtigkeit im Systemmodell bewertet. Die Ergebnisse sind sehr heterogen, so daß sich keine Variable endgültig ausschließen läßt. Es zeigt sich lediglich, daß von außen steuerbare Größen in diesem Modell offenbar keine große Rolle spielen. Die Bewertung der Variablen ist sehr subjektiv und spiegelt die persönliche Haltung des Studierenden zu dem Thema wider. Der komplette Variablenkatalog ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Abbildung 5.2 zeigt die durchschnittliche Bewertung aller sieben Gruppen. Wichtig ist zu beachten, daß nur die *direkte*

Variable			Qualitative Ausrichtung		Verhalten	
Nummer	Gruppe	Name	Hoher Wert	Niedriger Wert	Dynamik	Beeinflußbarkeit
1	Klima	Außentemperatur	heiß	→ kalt	Tag, Jahr	-
2		Sonnenstand	steil	→ flach	Tag, Jahr	-
3		Niederschlag	feucht	→ trocken	hoch, unregelmäßig	-
4		Wind	stürmisch	→ windstill	hoch, unregelmäßig	-
5	Verkehr Personen	Reisende / Personal	bewegt	→ unbewegt	Woche, Tag, Stunde	ja
6		Züge	bewegt	→ unbewegt	Woche, Tag, Stunde	ja
7	Gebäude	Gebäudehülle	massiv	→ leicht	-	1x
8		Bauwerksgröße / Luftvolumen	groß	→ klein	-	1x
9		Öffnungsgrad	geschlossen	→ offen	Türen, Fenster	ja
10		Raumgliederung	inhomogen	→ homogen	-	1x
11	Thermischer Komfort	Innenraumtemperatur	heiß	→ kalt	ja	ja
12		Empfundene Temperatur	angenehm	→ unangenehm	ja	1x
13		Luftbewegung	zugig	→ still	ja	ja
14		Luftqualität	sauber	→ schmutzig, stinkend	gering	ja
15	Kosten	Energieverbrauch	hoch	→ niedrig	ja	ja
16		Instandhaltung	teuer	→ günstig	ja	ja
17		Bau und Errichtung	teuer	→ günstig	1x	1x
18		Umweltkosten	hoch	→ gering	langfristig	ja
19	Technische Anlagen	Beleuchtung	künstlich	→ natürlich	Tag, Jahr	teilweise
20		Heizung	aktiv	→ passiv	Tag, Jahr	ja
21		Kühlung	aktiv	→ passiv	Tag, Jahr	ja
22		Fördertechnik	viel	→ wenig	ja	ja
23		Luftschleieranlage	viel	→ wenig	ja	ja

Abbildung 5.1: Definition und Gruppierung der Systemvariablen für Bahnhöfe

und nicht die indirekte Relevanz unter den Kriterien und Lebensbereichen bewertet werden darf. Folgende Bewertungen sind möglich:

Bewertung	Relevanz
0	irrelevant
1	wenig relevant
2	höchste Relevanz

Daraus resultiert, welche Variablen und welche Kriterien bei dem Systemmodell Bahnhof eine große, kleine oder gar keine Rolle spielen. Es zeigt aber auch, wie stark die Zusammenhänge der Variablen in den Augen der jeweiligen Bearbeiter sind. Die auszufüllende Tabelle beschreibt das Verhältnis von 23 Variablen zu 18 Kriterien, besteht also aus 414 Feldern. Um das Votum

Kriterien	Bewertung Wichtigkeit																			Summe Wichtigkeit
	Variablen	Menschen	Bewegung	Verkehrswege	Befinden	Umweltbeziehung	Flächenverbrauch	Innere Ordnung	Materie	Energie	Information	Flussgrößen	Strukturgrößen	Zeitliche Dynamik	Räumliche Dynamik	Input	Output	Von innen steuerbar	Von außen steuerbar	
1. Außentemperatur	1,1	0,4	0,4	1,0	0,9	0,1	0,7	1,6	1,7	0,7	1,7	0,0	1,7	0,6	1,7	0,0	0,0	0,0	14,4	
2. Sonnenstand	0,7	0,6	0,7	1,1	1,3	0,6	0,9	1,3	1,6	0,9	1,0	0,9	1,7	1,1	1,6	0,0	0,0	0,0	15,9	
3. Niederschlag	0,7	0,7	0,6	1,1	1,0	0,0	0,0	0,9	0,6	0,7	1,0	0,0	1,6	1,0	1,1	0,0	0,0	0,0	11,0	
4. Wind	0,9	0,7	0,7	1,1	0,6	0,3	0,3	0,9	1,0	0,9	1,4	0,1	1,6	1,0	1,4	0,1	0,0	0,0	13,0	
5. Reisende / Personal	1,3	1,6	1,3	1,1	0,7	1,4	1,6	1,0	1,3	1,9	1,6	0,3	1,6	1,6	1,9	1,4	1,1	0,9	23,4	
6. Züge	1,6	2,0	1,7	0,9	1,1	1,4	1,4	1,0	1,1	1,3	1,6	0,7	1,9	1,1	1,4	1,3	1,7	1,4	24,7	
7. Hülle	1,1	0,4	1,1	1,0	1,3	1,1	1,1	1,0	1,7	0,7	0,1	1,9	0,0	0,9	0,7	0,9	1,3	0,1	16,6	
8. Größe / Luftvolumen	1,0	0,6	1,1	1,4	0,7	1,4	1,1	0,6	1,6	0,6	0,3	1,4	0,1	0,7	0,7	0,6	0,9	0,1	15,0	
9. Öffnungsgrad	1,1	1,1	1,4	1,1	1,0	1,0	1,6	1,1	1,7	1,0	0,3	1,1	0,7	1,0	1,1	0,4	1,6	0,3	18,9	
10. Raumgliederung	1,4	1,9	1,6	1,0	0,7	1,6	1,7	0,7	1,6	1,1	0,1	1,7	0,1	1,0	0,9	0,4	1,1	0,1	18,9	
11. Empfundene Temperatur	1,9	0,9	0,7	1,4	1,3	0,6	0,4	1,6	1,9	0,7	1,6	0,1	1,3	1,1	1,1	1,1	1,6	0,3	19,6	
12. Temperatur	1,6	0,9	0,4	1,4	0,7	0,4	0,1	1,1	1,4	0,9	1,0	0,3	1,3	1,0	1,0	0,9	1,3	0,4	16,1	
13. Luftbewegung	1,4	1,0	1,1	1,6	1,3	0,4	0,9	1,0	1,3	0,4	1,6	0,0	1,7	1,6	1,1	0,7	1,6	0,6	19,3	
14. Luftqualität	1,6	0,4	0,4	1,7	0,9	0,1	0,1	0,6	1,0	0,6	1,1	0,1	1,6	1,6	1,4	0,7	1,4	1,0	16,4	
15. Energieverbrauch	0,6	0,3	0,6	0,3	1,3	1,0	0,9	1,4	1,6	0,6	1,4	0,6	1,6	1,1	0,9	1,6	1,4	0,7	17,7	
16. Instandhaltung	0,7	0,1	0,7	0,6	0,4	0,4	0,4	1,6	0,9	0,6	0,3	0,6	0,6	0,9	0,9	0,6	0,9	0,6	11,6	
17. Bau / Errichtung	1,0	0,3	1,3	0,3	0,6	0,9	1,1	2,0	1,6	1,1	0,1	1,7	0,6	0,9	1,0	0,7	1,4	1,4	18,0	
18. Umweltkosten	0,6	0,1	0,4	0,0	1,1	0,9	0,4	1,4	1,7	0,3	0,6	1,0	0,7	0,6	0,9	0,9	1,1	0,6	13,3	
19. Beleuchtung	1,9	1,0	1,4	1,6	1,1	0,6	1,4	0,7	2,0	1,9	1,3	0,6	1,6	1,6	1,0	1,6	1,9	0,7	23,7	
20. Heizbedarf	1,0	0,4	1,0	1,4	1,0	1,0	0,7	1,4	2,0	0,3	1,1	0,3	1,6	1,4	1,0	1,0	1,4	0,3	18,4	
21. Kühlbedarf	1,0	0,1	0,6	1,1	1,0	0,7	0,6	1,7	2,0	0,3	1,1	0,3	1,6	1,3	1,0	1,0	1,4	0,3	17,1	
22. Fördertechnik	1,6	2,0	1,7	0,7	0,7	1,4	1,1	0,3	1,9	1,0	0,7	1,6	1,7	1,1	1,0	0,7	1,6	0,6	21,4	
23. Luftschleieranlagen	1,3	0,9	1,0	1,6	0,9	0,3	0,7	0,6	1,9	0,4	1,4	0,3	1,7	1,6	0,9	0,9	1,7	0,3	18,1	
Summe Wichtigkeit	27,0	18,4	22,1	24,7	21,6	17,7	19,4	25,4	34,9	18,7	22,6	15,6	28,4	25,7	25,7	17,4	26,4	10,7	402,6	

Abbildung 5.2: Durchschnittliche Bewertung der Variablen von 7 verschiedenen Gruppen

einer Gruppe in Relation zu den anderen Bewertungen setzen zu können, ist es nötig, wie viele Relevanzpunkte die Gruppe insgesamt gibt, und wie eindeutig sie sich entscheidet. Diese beiden Kenngrößen *Stärke* und *Eindeutigkeit* der Bewertung werden in diesem Zusammenhang mit *Mittelwert* und *Varianz* bezeichnet.

$$\text{Mittelwert} = \frac{\sum \text{alle Relevanzpunkte}}{414}$$

Wirkung von unten auf links	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	Aktiv-Summe	Produkt
1. Außentemperatur	X	0	1	2	0	0	0	0	1	0	3	2	1	0	0	0	0	0	1	3	3	0	1	18	72
2. Sonnenstand	2	X	1	1	0	0	1	0	0	1	2	2	1	0	0	0	0	0	3	2	2	0	0	18	0
3. Niederschlag	1	0	X	0	2	0	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	9	18
4. Wind	0	0	0	X	3	0	2	0	3	2	0	2	3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	19	57
5. Reisende / Personal	0	0	0	0	X	2	1	1	2	1	1	1	1	1	0	3	2	1	2	2	2	2	2	27	783
6. Züge	0	0	0	0	2	X	0	0	1	0	1	0	2	0	0	1	2	1	1	0	0	0	0	11	55
7. Hülle	0	0	0	0	1	0	X	0	2	0	2	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	9	90
8. Größe / Luftvolumen	0	0	0	0	1	0	0	X	0	2	2	3	2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	16	80
9. Öffnungsgrad	0	0	0	0	1	0	2	0	X	0	2	1	3	2	0	0	0	0	2	0	0	0	3	16	288
10. Raumgliederung	0	0	0	0	1	0	0	2	2	X	2	3	2	1	1	0	0	0	2	1	1	3	2	23	184
11. Innentemperatur	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	X	3	2	0	3	0	0	0	1	3	3	0	1	18	360
12. Empfundene Temperatur	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	X	0	0	3	0	0	1	0	2	2	0	2	14	308
13. Luftbewegung	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2	3	X	2	3	0	0	0	0	3	2	0	3	21	504
14. Luftqualität	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0	X	1	0	0	1	0	0	0	0	2	8	88
15. Energieverbrauch	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	1	3	0	0	0	0	1	5	125
16. Instandhaltung	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	1	0	2	0	0	0	0	4	40
17. Bau / Errichtung	0	0	0	0	0	0	2	2	1	2	1	1	0	0	1	2	X	1	2	0	1	0	0	16	128
18. Umweltkosten	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	X	0	0	0	0	0	3	24
19. Beleuchtung	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	X	0	0	0	0	10	200
20. Heizbedarf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	X	0	0	0	3	54
21. Kühlbedarf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	X	0	0	3	60
22. Fördertechnik	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	1	0	0	0	0	0	X	0	10	60
23. Luftschleieranlagen	0	0	0	0	3	0	0	0	2	0	1	0	3	2	2	0	0	0	1	2	0	X	0	16	336
Passiv-Summe	4	0	2	3	29	5	10	5	18	8	20	22	24	11	25	10	8	8	20	18	20	6	21	X	
Quotient*100	450	##	450	633	93	220	90	320	89	288	90	64	88	73	20	40	200	38	50	17	15	167	76		

Farberläuterung: aktiv passiv kritisch äußernd

Abbildung 5.3: Rollenmodell und Wirkungen der Systemvariablen

$$\text{Varianz} = \frac{\text{Anzahl}(0) \cdot \text{Anzahl}(2)}{\text{Anzahl}(1)}$$

Bei den 7 unterschiedlichen Bewertungen ergibt sich folgendes Bild:

Gruppe	$\sum \text{alle}$	Mittelwert	$\sum 0$	$\sum 1$	$\sum 2$	Varianz
1	331	0,80	203	91	120	267,7
2	354	0,86	215	44	155	757,4
3	372	0,90	173	110	131	206,0
4	384	0,93	140	164	110	93,9
5	419	1,01	86	237	91	33,0
6	512	1,24	96	124	194	150,2
7	547	1,32	85	111	218	166,9

Gruppe 1 hat die geringste Anzahl Relevanzpunkte vergeben, Gruppe 7 die meisten. Die größte Varianz hat das Votum von Gruppe 2, die sich am eindeutigsten für oder gegen die Relevanz einer Variablen unter bestimmten Kriterien entschieden hat. Die geringste Eindeutigkeit liegt bei Gruppe 5 vor: Hier ist am häufigsten mit der Bewertung „1 = wenig relevant“ votiert worden.

Neben der durchschnittlichen Bewertung sind Übereinstimmung und Uneinigkeit unter den Studierenden ein wichtiges Indiz für die Belastbarkeit der Ergebnisse. Dadurch soll ausgeschlossen werden, daß einzelne Ausreißer in der Bewertung, beispielsweise hervorgerufen durch eine falsch-verstandene Variablendefinition, die Variablenwahl für das Gesamtmodell verzerren.

5.1.2 Wirkungsgefüge

Gesamtmodell Bahnhof

Bei einem Satz von 23 Variablen wäre es immer noch zu umfangreich, jede Variable mit jeder anderen durch einen Algorithmus zu vernetzen. Zum einen gäbe es numerische Instabilitäten, bei vielen Variablen wäre die Verknüpfung auch aus fachlichen Gründen nicht sinnvoll. Daher wird im nächsten Schritt untersucht, welche Wechselwirkungen zwischen den Modellvariablen berücksichtigt werden sollen.

Die Studierenden aus dem Seminar „Wohlfühlbahnhof“ haben in einer Matrix für jedes Variablenpaar zwei Bewertungen abgegeben, die besagt, wie stark die Veränderung des Zustandes einer Variablen die jeweils andere beeinflusst. Angegeben wird sowohl die Stärke der Verknüpfung als auch die Richtung der Beeinflussung. Es gibt also bei jeder Verknüpfung eine aktive und eine passive Variable.

Bewertung	Einfluß
0	kein Einfluß
1	schwacher Einfluß
2	proportionaler Einfluß
3	überproportionaler Einfluss

Dabei zeigt sich, welche Variablen in dem System eine besonders aktive Rolle einnehmen und andere Variablen beeinflussen, während solche, die passiv sind, selbst kaum Einfluß auf das System nehmen. Zudem gibt es kritische Variablen, die Wirkungen verstärkt weitergeben, und solche, die puffernd wirken.

Zur Auswertung werden daher folgende Begriffe eingeführt[80]:

Aktiv-Summe ist die Summe aller Verknüpfungsfaktoren einer Variable, die eine aktive Rolle gegenüber anderen Variablen ausdrücken („gebende Wirkung“).

Passiv-Summe ist die Summe aller Verknüpfungsfaktoren einer Variable, die eine passive Rolle gegenüber anderen Variablen ausdrücken („empfangende Wirkung“).

Das Produkt P aus Aktiv- und Passivsumme gibt an, wie *kritisch* eine Variable im Wirkungsgefüge ist. Eine kritische Variable reagiert stark auf Veränderungen anderer Variablen und gibt diese Veränderungen stark weiter.

Der Quotient $Q = \frac{\text{Aktivsumme}}{\text{Passivsumme}}$ drückt aus, wie *puffernd* bzw. stabilisierend eine Variable sich im System auswirkt.

Um visuell darzustellen, welche Rolle eine Variable im Wirkungsgefüge einnimmt, werden alle Variablen durch zwei Funktionsvorschriften transformiert in einem Koordinatensystem angezeigt:

$$\begin{array}{ll} (1) & x = \text{Passivsumme} \quad y = \text{Aktivsumme} \\ (2) & y = Q * x \quad \text{Abstand zum Ursprung} = P \end{array}$$

Gehen beide Vorschriften zu jeweils 50% in die Positionierung der Variable im Wirkungsgefüge ein, kommen die Bearbeiter zu den in Abbildung 5.4 dargestellten Rollenbildern.

Bei der Analyse der Grafiken fällt auf, daß es zwei *Typen* von Bewertern gibt. Die Urheber der Rollenschemata, die zu den Grafiken in der oberen Reihe geführt haben, sehen die Menschen in Form von Angestellten und Reisenden als *die* kritische Größe im System. Die anderen Gruppen sehen eher in architektonischen Merkmalen kritische Variablen. Zudem fällt auf, daß der Vernetzungsgrad bei den Modellen der Gruppen von links nach rechts zunimmt. In der Abbildung äußert sich das dadurch, daß immer mehr Variablen eine kritische Rolle einnehmen und es weniger puffernde oder rein aktive bzw. passive Variablen gibt. Bei den Lösungsansätzen, die eine starke Beziehung zwischen allen Variablen sehen, befinden sich nahezu alle Variablen im kritischen Bereich; das Netz wirkt ungerichtet und formlos.

Bei der Analyse der Bewertungen fällt auf, daß es gewisse Gruppierungen von Variablen gibt, die untereinander stark verknüpft sind, aber zu anderen Gruppen nur eine schwache Verknüpfung haben. Es bilden sich also Verknüpfungszentren heraus. Lediglich die Variable *Mensch*, stellvertretend für Personal, Reisende und sonstige Kunden erfährt eine zentrale Funktion und ist mit allen übrigen Variablen stark verbunden. In Abbildung 5.3 sieht man außerdem, daß die meisten Wirkungen rechts oberhalb der Diagonalen liegen. Daraus folgt, daß die in der gegebenen Reihenfolge erstgenannten Variablen tendenziell aktiv, während die unteren passiv sind.

Bevor die Wirkungen zwischen den eindimensionalen Variablen mathematisch formuliert werden, soll mit Hilfe der Abbildungen 5.5 und 5.6 verdeutlicht werden, welche Subsysteme und Detailvariablen sie darstellen. Abbildung 5.5 zeigt die aus der bisherigen Analyse hervorgehenden

aktiven, passiven und kritischen Detailvariablen. In Abbildung 5.6 links werden die technischen Anlagen aufgeführt, die im Wirkungsgefüge repräsentiert werden. Auf der rechten Seite folgt die Differenzierung nach Variablen, die einmalige oder laufende Kosten bedeuten.

Bevor das Gesamtmodell Bahnhof als Wirkungsgefüge erstellt und simuliert wird, werden zunächst die bedeutendsten Teilsysteme qualitativ betrachtet sowie ein Wirkungsgefüge des Subsystems ServicePoint entwickelt. Teilsysteme sind so voneinander abzugrenzen, daß der verbleibende innere Vernetzungsgrad möglichst hoch ist, und nur wenige Wirkungen zertrennt werden. Zer-

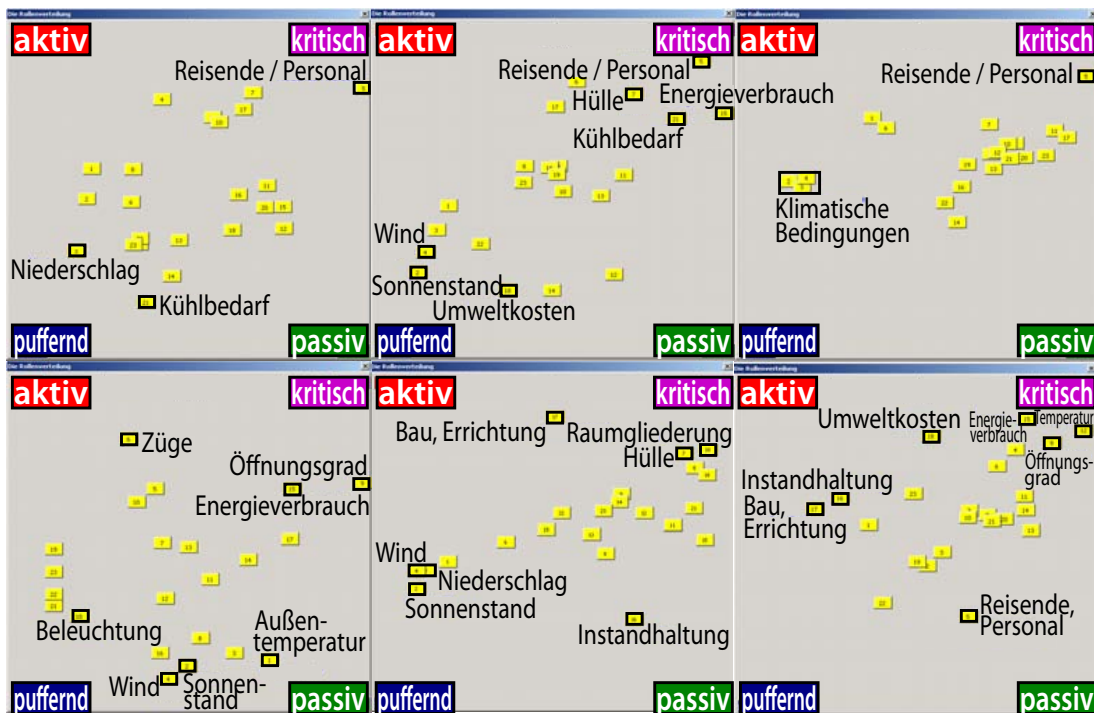


Abbildung 5.4: Sechs verschiedene Rollenmatrizen im Wirkungsgefüge *Personenbahnhof*

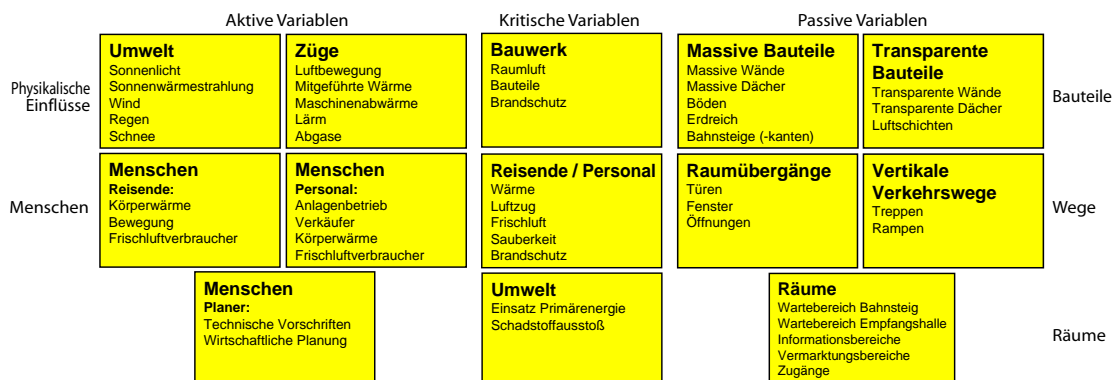


Abbildung 5.5: Aktive, kritische und passive Variablen

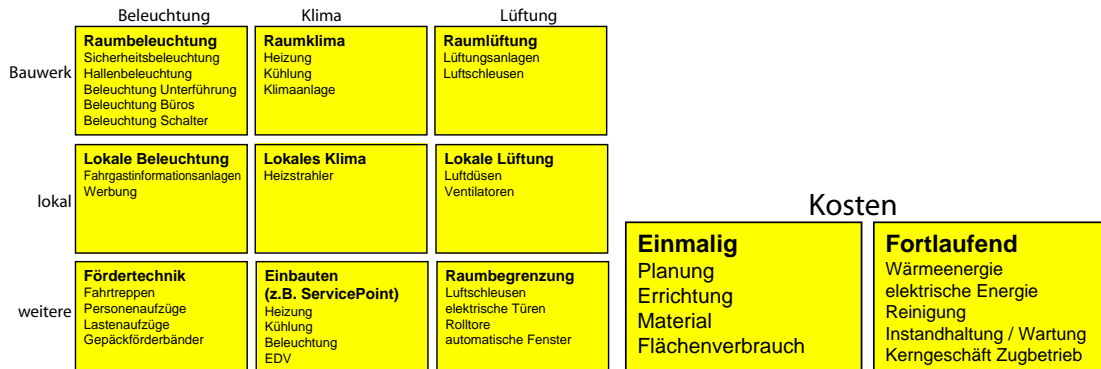


Abbildung 5.6: Technische Anlagen sind vordergründig die Energieverbraucher in Bahnhöfen

trennte Wirkungen werden zu Randbedingungen an den Schnittstellen zu anderen Teilsystemen. Aus der oben entwickelten Rollenmatrix wird deutlich, daß das System Bahnhof kein gleichmäßiger Kreislauf ist. Es gibt

- Eingangsgrößen,
- resultierende Größen und
- abgeleitete Größen,

welche allerdings Grund dafür sein können, gewisse Stellhebel bei den Eingangsgrößen zu bewegen. Bei den Eingangsgrößen sind

- dynamische Einflüsse und
- konstante Einflüsse

zu unterscheiden. Die dynamischen Einflüsse, wie beispielsweise der Sonnenstand, ändern sich während einer Simulation, die konstanten können nur vor einem Simulationslauf zum anderen verändert werden und bleiben dann fest, wie z.B. der Öffnungsgrad der Hülle. Außerdem ist zwischen steuerbaren Einflüssen wie der Öffnungsgrad und nicht steuerbaren Einflüssen wie der Sonnenstand zu unterscheiden. Die resultierenden Größen teilen sich in die Bereiche

- Temperatur
- Luft
- Bewegung
- Licht

Resultierende Größen sind (Primär-) Energieeinsatz, Komfort und Eisenbahnbetrieb.

Teilsysteme

Die Abbildungen 5.7 und 5.8 zeigen qualitativ die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Aspekten thermischen Komforts und Energieverbrauch in verschiedenen Raumzonen eines

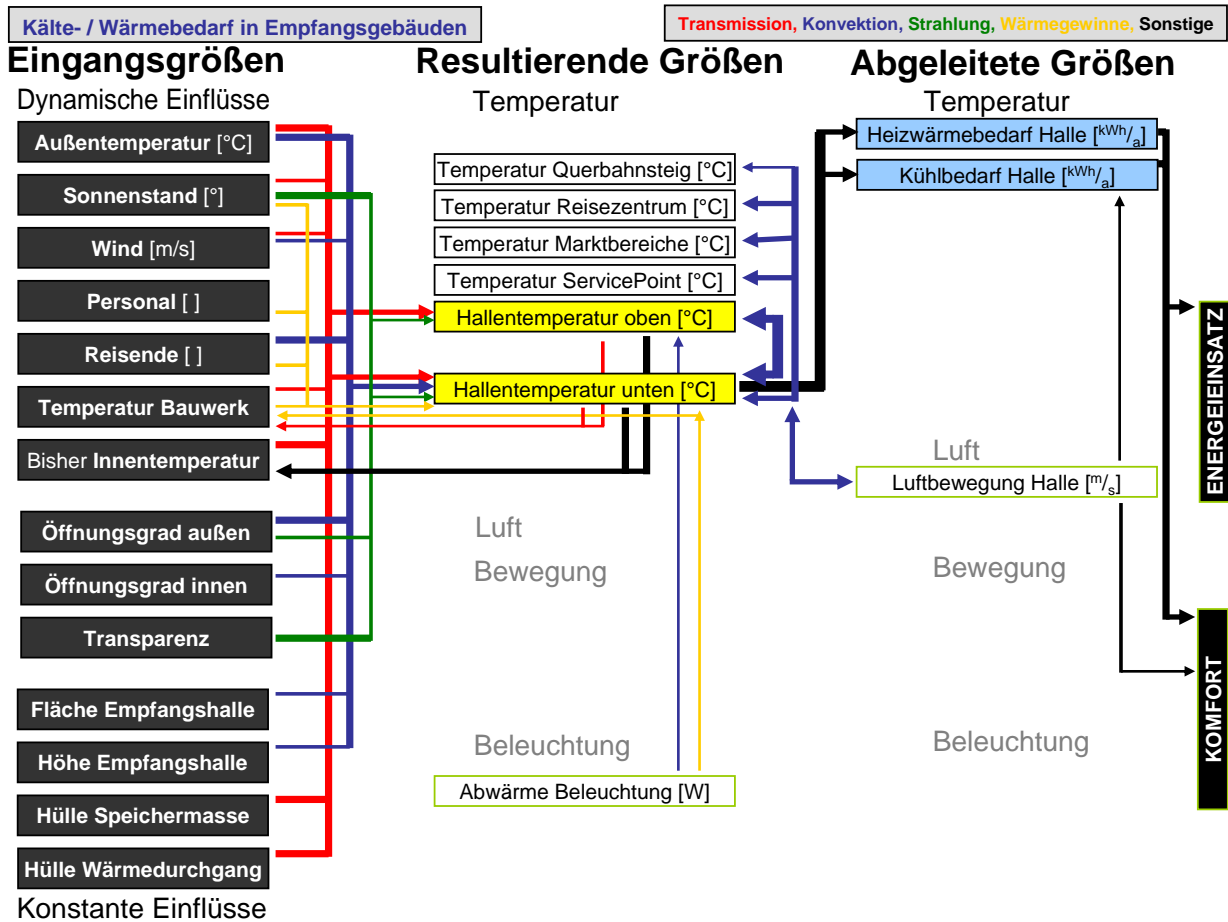


Abbildung 5.7: Energieströme und Komfort im Empfangsgebäude

Bahnhofs. Die Ortsbezeichnungen orientieren sich an der räumlichen Struktur des Darmstädter Hauptbahnhofs, der in Abschnitt 6.1.1 näher beschrieben wird, sind aber universell auf alle Bahnhöfe mit Empfangsgebäude, Überführung und ServicePoint anwendbar.

Abbildung 5.7 stellt vereinfacht die Energieströme in Form von Wärme in einer Empfangshalle dar. Aus diesen Strömen ergibt sich der Kälte- und Wärmebedarf in den Empfangsgebäuden. Die Pfeile markieren die Strömungsrichtung. Die Dicke der Pfeile symbolisiert qualitativ die Stärke und Relevanz der jeweiligen Strömung. Auf der linken Seite der Grafik sieht man die Eingangsgrößen, sortiert nach ihrer Dynamik pro Zeiteinheit. Die Farben bedeuten:

rot	Wärmetransmission
blau	Konvektion mit der Luft
grün	Wärmestrahlung
gelb	Interne Wärmegewinne
schwarz	Daraus folgende Wirkungen

Der Wärme- und Kältebedarf wird stark durch die Hallenhöhe und den natürlichen Auftrieb bestimmt. Eine unerwünschte vertikale Luftschichtung im Winter mit der wertvollen warmen Luft über den Köpfen der Menschen unter dem Hallendach kann beispielsweise mit Ventilatoren, Luftdüsen oder transparenten Stoffbahnen reduziert werden¹. Ein Heizwärmebedarf hat natürlich nur dann wirtschaftliche Folgen, wenn tatsächlich eine Heizung installiert und betrieben wird.

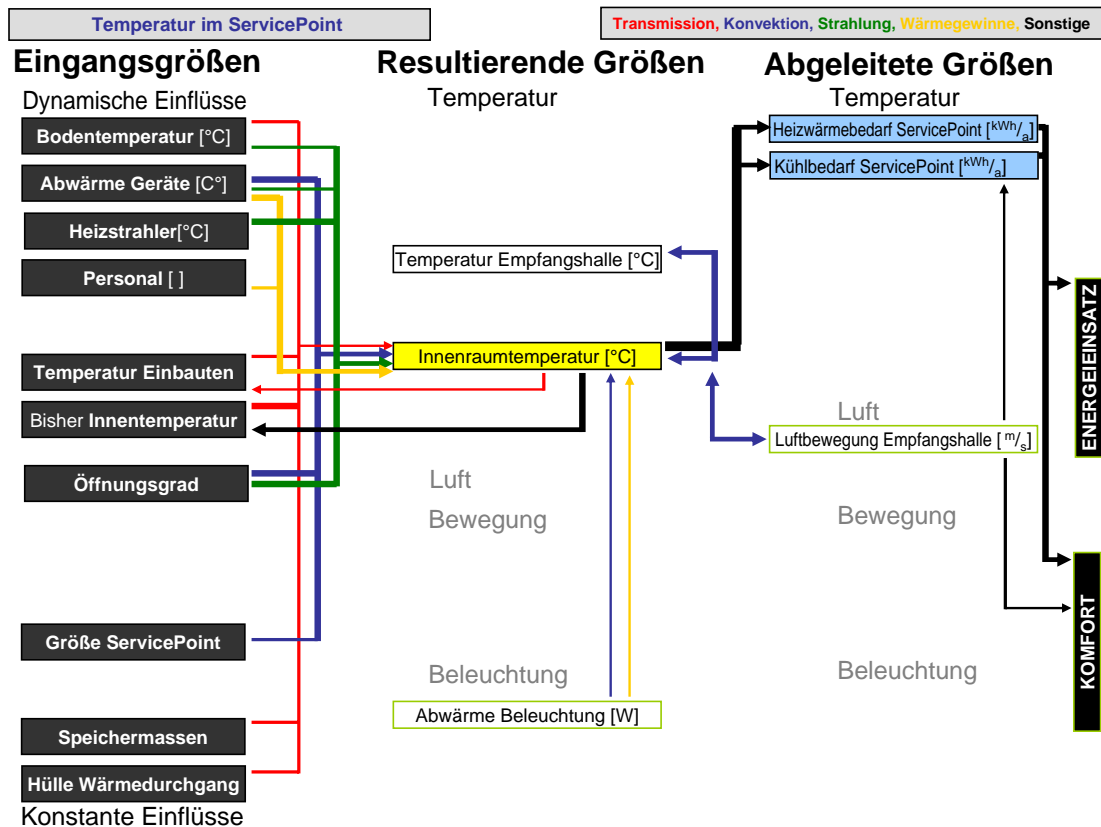


Abbildung 5.8: Detailbetrachtung: Energie und Komfort im ServicePoint

Abbildung 5.8 zeigt ein Teilmodell der Empfangshalle, den ServicePoint. Der ServicePoint ist Arbeitsplatz für Mitarbeiter des Bahnhofs, die Reisende mit Informationen versorgen. Daher sollte der ServicePoint die thermischen Rahmenbedingungen eines Arbeitsplatzes für ganztägige, sitzende Tätigkeit erfüllen. Da die Mitarbeiter jedoch direkten akustischen und visuellen Kontakt zu den Kunden haben und gedruckte Informationen ausgeben, ist der ServicePoint offen und steht im Luftaustausch mit der umgebenden Halle. Die Halle besitzt ein wesentlich größeres Luftvolumen, eine große thermische Trägheit und bestimmt die Lufttemperatur im ServicePoint. Im ServicePoint erwärmte Luft entweicht aufgrund des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik in die Halle und verteilt ihr höheres energetisches Potential gleichmäßig, wodurch ihr komplettes Exergiepotential in Anergie umgewandelt wird. Die thermische Behandlung des ServicePoints

¹Das Prinzip der horizontalen Stoffbahnen wurde beim japanischen Pavillon auf der Messe EXPO2000 in Hannover realisiert und an der TU Darmstadt simuliert, jedoch hier nicht weiter dargestellt

und der umgebenden Halle unter der Prämisse möglichst geringen Energieverbrauchs ist eine der größten Herausforderungen bei der Optimierung der Energieeffizienz von Personenbahnhöfen.

Wirkungsgefüge ServicePoint

Die Grafiken in Abbildung 5.9 und 5.10 zeigen verschiedene Modellansätze des Wirkungsgefüges ServicePoint, die zusammen mit Studierenden des Seminars „Wohlfühlbahnhof“ an der TU Darmstadt entwickelt wurden. Das Modell umfaßt 11 Variablen, die von den Studierenden verknüpft werden sollten. An zentraler Stelle stehen die Variablen „Zufriedenheit der Kunden“ und „Geschäftlicher Mehrwert“, der die Zufriedenheit der Betreiber beeinflusst. Sie sind gewissermaßen das Ziel, für dessen Erreichung überhaupt ServicePoints betrieben werden. Die „Zufriedenheit des Personals“ vervollständigt die kritischen Modellvariablen in der mittleren Spalte. Auf der rechten Seite befinden sich die ebenfalls dynamischen Variablen, die den Betrieb des ServicePoints widerspiegeln, wohingegen auf der linken Seite Variablen stehen, die die Art des ServicePoints betreffen, bei Planung und Bau definiert werden und sich danach nicht mehr ändern.

In ein Wirkungsgefüge dürfen nur *direkte* Wirkungen eingetragen werden, die indirekten Wirkungen ergeben sich aus der Simulation. Farbe und Muster der Pfeile habe folgende Bedeutung:

Farbe	Strich	Wirkung je nach Steigung	Wirkung je nach Steigung
schwarz	durchgehend	je stärker desto mehr ¹	je schwächer desto weniger ¹
rot	gestrichelt	je stärker desto weniger ²	je schwächer desto mehr ²
blau	durchgehend	je extremer, desto mehr	je flacher, desto weniger
grün	gestrichelt	je extremer, desto weniger	je flacher, desto mehr

Die Anzahl der Wirkungen zwischen den Variablen nimmt von Modell zu Modell zu. Modelle mit zu wenigen Wirkungen verhalten sich deterministisch, Modelle mit zu vielen Wirkungen chaotisch und instabil. Die Gefahr, daß die Anzahl zu groß wird, besteht dann, wenn die Gruppe zu lange über das Modell diskutiert und immer mehr vermeintlich direkte Verknüpfungen findet. Daher sollte der Auswahlprozeß mit mehreren Gruppen und unter Zuhilfenahme des Sensitivitätsmodells und der Rollenmatrix² nach Frederic Vester[80] stattfinden.

5.1.3 Mathematische Modellierung der Wirkungen

Das Wirkungsgefüge setzt sich zusammen aus Variablen, die Werte auf einer eindimensionalen Skala annehmen können, und Wirkungen, die für dynamische Bewegungen im Modell sorgen, welche möglichst gut die kausalen Zusammenhänge in der Wirklichkeit wiedergeben. Die Ergebnisse dieser Bewegungen sollen zeigen, welche indirekten Wirkungszusammenhänge in einem System bestehen, und wie durch intelligente Regelmechanismen ein System in die Lage versetzt werden kann, aus seiner Eigendynamik heraus stabile Gleichgewichte zu erzeugen.

¹Proportional

²Reziprok

²siehe 3.6.2, 5.1.1 und 5.1.2

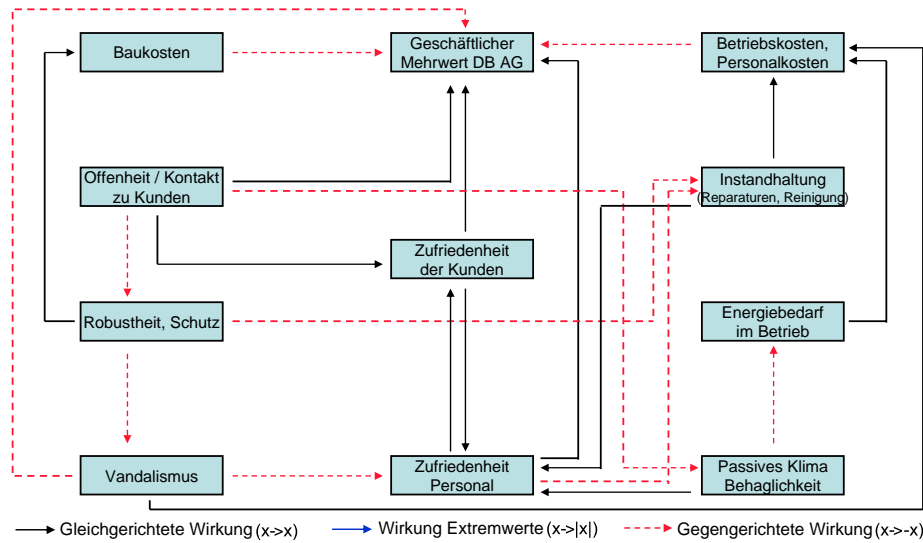


Abbildung 5.9: Wirkungsgefüge ServicePoint, Variante 1

Die Bewegung innerhalb des Modells entsteht dadurch, daß die Variablen sich gegenseitig in ihrer Lage beeinflussen und diese dadurch verändern. Durch die Änderung der Variablen ändern sich auch die Wirkungen, so daß eine erneute Berechnung der Veränderungen und Wirkungen iterativ ständig neue Modellzustände erzeugt. Dabei sind drei verschiedene Verhaltensweisen möglich:

1. Das Modell konvergiert, d.h. die Variablen ändern sich nicht mehr
2. Das Modell divergiert, d.h. einige oder alle Variablen streben gegen \pm Unendlich

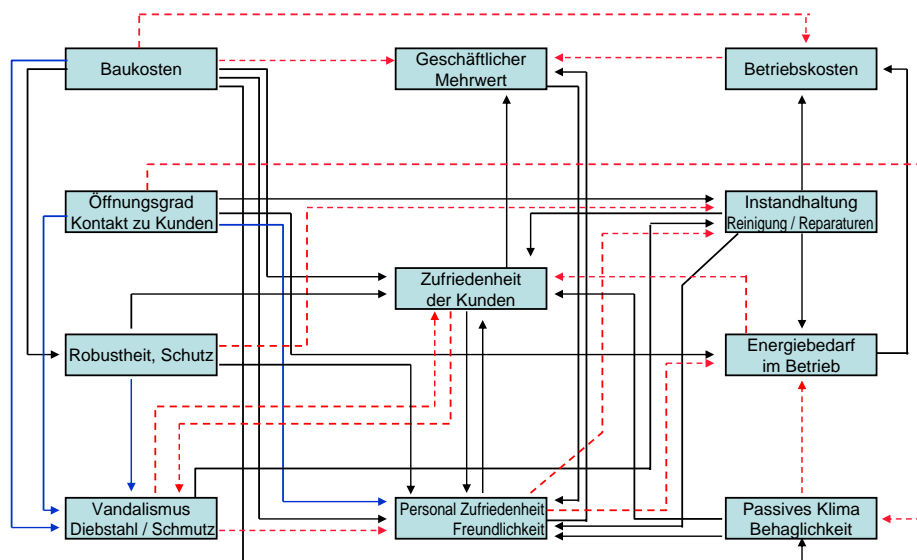


Abbildung 5.10: Wirkungsgefüge ServicePoint, Variante 2

3. Das Modell schwingt, d.h. die Variablen bewegen sich zyklisch innerhalb ihres Wertebereichs

Die Wirkungen zwischen den Variablen kann man sich wie Anziehungskräfte zwischen zwei Maseteilchen vorstellen, wobei eine Wirkung jedoch keine gegenseitige Anziehung, sondern nur eine einseitige Kraft repräsentiert. Anziehungskräfte entsprechen den in Abschnitt 5.1.2 genannten gleichgerichteten Wirkungen (je mehr desto mehr oder je weniger desto weniger), Abstoßkräfte entsprechen gegengerichteten Wirkungen. Die mathematische Formulierung dieser Wirkungen soll im Folgenden beschrieben werden.

Eine *Je mehr desto mehr*-Wirkung setzt voraus, daß es eine Methode gibt, das *je mehr* numerisch zu messen. Als antreibende Größe einer Variablen können sowohl ihre Lage³ als ihre Bewegung⁴ in Frage kommen:

Lage Der aktuelle Wert einer Variablen

Steigung Die Änderungsgeschwindigkeit bzw. die erste Ableitung einer Variablen

Krümmung Die Beschleunigung bzw. die zweite Ableitung einer Variablen

Die empfangenden Variablen können ebenfalls direkt in ihrer Lage oder indirekt in ihrer Steigung oder Beschleunigung beeinflußt werden. Theoretisch sind auch höhere Ableitungen möglich, bei diesem Modell kommen jedoch nur Ableitungen bis zur 2. Ordnung zum Einsatz. Sowohl bei der Beurteilung des eigentlichen Variablenwertes (Lage) als auch der Ableitungen muß ein Maß dafür gefunden werden, *was* ein hoher Wert und *was* ein niedriger Wert, *was* eine große Steigung und *was* eine geringe Steigung bzw. starke oder schwache Krümmung ist.

Modell 0. Ordnung

Die Lage einer Wirkung sendenden Variablen kann sowohl *absolut* als auch *relativ* zu der empfangenden Variable gemessen werden. Da alle Variablen ein festes Intervall als Wertebereich besitzen, z.B. 0% bis 100%, bietet sich als absolutes Lagemaß der vorzeichenbehaftete Abstand zwischen dem Wert der Variablen und dem Mittelpunkt des Intervalls:

$$\delta_{s,abs}^* = Y_s - \bar{Y}_s \quad (5.1)$$

Y_s	Wert der Sender-Variablen
\bar{Y}_s	Neutraler Wert ⁵ des Definitionsintervalls der Sendervariablen
$\delta_{s,abs}^*$	Absolute, skalierte Lagebewertung bei einer proportionalen Wirkung
$\delta_{s,abs}$	Absolute, skalenunabhängige Lagebewertung einer Sendervariablen

$$\bar{Y}_s = \frac{Max_s + Min_s}{2} \quad (5.2)$$

³entspricht der potentiellen Energie in der Mechanik

⁴entspricht der kinetischen Energie in der Mechanik

⁵entspricht der Intervallmitte, bei symmetrisch definierten Variablen. Bei Schiefe kann der neutrale Wert auch am Intervallrand liegen, wie z.B. bei der Variablen „Vandalismus“. Vandalismus gibt es nur in seiner negativen Ausprägung, spontane Reparaturmaßnahmen durch Dritte kommen praktisch nicht vor.

Max_s Obere Intervallgrenze des Definitionsintervalls der Sendervariablen

Min_s Untere Intervallgrenze des Definitionsintervalls der Sendervariablen

Ist die Wirkung einer Sendervariablen auf eine Empfängervariable nicht proportional, sondern extremal, das heißt extrem hohe und extrem niedrige Werte der Sendervariablen wirken antreibend, mittlere Werte jedoch senkend auf die Empfängervariable, wird anstelle von $\delta_{s,abs}^*$ $\delta_{s,abs}^{ext}$ eingesetzt:

$$\delta_{s,abs}^{ext} = \left| \delta_{s,abs}^* \right| - \frac{Max_s - Min_s}{4} = \left| Y_s - \bar{Y}_s \right| - \frac{Max_s - Min_s}{4} \quad (5.3)$$

Bei einer entgegenwirkenden, reziproken Wirkung wird die Lagebewertung mit -1 multipliziert:

$$\delta_{s,abs}^{rez} = -\delta_{s,abs}^* = \bar{Y}_s - Y_s \quad (5.4)$$

Der Differenzwert $\delta_{s,abs}$ ist abhängig von der Skalierung der Sendervariablen. Um diesen Einfluß zu mindern und die numerische Stabilität des Simulationsalgorithmus zu erhöhen, wird $\delta_{s,abs}^*$ durch die Wurzel aus der Größe des Definitionsintervalls geteilt:

$$\delta_{s,abs} = \frac{\delta_{s,abs}^*}{\sqrt{Max_s - Min_s}} = \frac{Y_s - M_s}{\sqrt{Max_s - Min_s}} \quad (5.5)$$

Gleichung (5.5) gilt analog für $\delta_{s,abs}^{ext}$, $\delta_{s,abs}^{rez}$ und $\delta_{s,abs}^{rez,ext} = -\delta_{s,abs}^{ext}$.

Bei der Bewertung der *relativen* Lage einer Sendervariablen spielt die Differenz zur Wirkung empfangenden Variable die tragende Rolle:

$$\delta_{s,rel}^* = Y_s - Y_e \quad (5.6)$$

Y_e Wert der Empfängervariablen

$\delta_{s,rel}^*$ Relative Lagebewertung einer Sendervariablen bezogen auf eine Empfängervariable

$\delta_{s,rel}$ Relative, skalenunabhängige Lagebewertung

Für die extreme Beziehung zwischen zwei Variablen gilt:

$$\delta_{s,rel}^{ext} = \left| \delta_{s,rel}^* \right| - \frac{max_s - min_s + max_z - min_z}{8} \quad (5.7)$$

Bei reziproken Beziehungen wird der jeweilige Wert $\delta_{s,rel}^*$ oder $\delta_{s,rel}^{ext}$ mit -1 multipliziert.

Auch hier ist eine Berücksichtigung der Skalierung nötig, da

- die Sender- und Empfängervariablen unterschiedlich skaliert sein können
- Differenzen in großer Entfernung vom Intervallzentrum eine relativ kleine Bedeutung haben⁶
- zu große δ -Werte die numerische Stabilität gefährden.

⁶Beispiel: Die preisliche Differenz von 1000 Euro zwischen zwei Produkten A und B ist relativ gesehen größer, wenn A 50 Euro und B 1050 Euro kostet, als wenn A 5000 Euro und B 6000 Euro kostet

Daher wird $\delta_{s,rel}^*$ mit dem in Gleichung 5.8 beschriebenen Faktor multipliziert:

$$\begin{aligned}\delta_{s,rel} &= (\delta_{s,rel}^* - \bar{Y}_s + \bar{Y}_e) f(Y_s, Y_e, Max_s, Min_s, Max_e, Min_e) \\ &= (Y_s - \bar{Y}_s - Y_e + \bar{Y}_e) \frac{\sqrt{(Max_s - Y_s)(Y_s - Min_s)}}{Max_s - Min_s} \frac{\sqrt{(Max_e - Y_e)(Y_e - Min_e)}}{Max_e - Min_e}\end{aligned}\quad (5.8)$$

Die δ_s repräsentieren also numerisch die Wirkung, mit der eine Variable S eine Variable E in ihrer Lage beeinflusst. Diese Werte können durch Faktoren und Potenzen in ihrer Stärke und Reaktion manipuliert werden, und die beiden Methoden der Lagebewertung aufgrund absoluter und relativer Gesichtspunkte mit dem Verhältnis $0 < \alpha < 1$ gemischt werden:

$$\delta_s = \alpha \phi \text{sgn}(\delta_{s,abs}) |\delta_{s,abs}|^\theta + (1 - \alpha) \phi \text{sgn}(\delta_{s,rel}) |\delta_{s,rel}|^\theta \quad (5.9)$$

δ_s	Wirkung einer Sender- auf eine Empfängervariable
α	Anteil der Absolutbewertung gegenüber Relativbewertung der Lage
ϕ	Faktor zum Verstärken oder Schwächen einer Wirkung.
$D(\phi) = (\frac{1}{2}; 1; \frac{3}{2}; 2)$	
θ	Potenz zum Beschleunigen oder Bremsen einer Wirkung.
$D(\theta) = (\frac{1}{2}; 1; 2)$	

Die Gesamtwirkung, die eine Empfängervariable erhält, ist die Summe aller Einzelwirkungen δ_s , die auf sie zeigen:

$$\delta_e = \sum_{i=1}^n \delta_{s,i} g_i e^{-0,1|Y_{s,i}-Y_e|} \quad (5.10)$$

δ_e	Gesamtwirkung auf die Empfängervariable
g_i	Gewicht der Wirkung i . $\sum g_i = 100\%$
$e^{\frac{1}{10} Y_{s,i}-Y_e }$	Gravitationsterm zur Gewichtung der Entfernung zwischen zwei Variablen und Schutz vor schnellen Divergenzen
$e^{\frac{1}{20}(Y_{s,i}-\bar{Y}_s + Y_{e,i}-\bar{Y}_e)}$	Entsprechender Term bei Extremalwirkung
n	Anzahl der Wirkungen, die auf die Empfängervariable zielen

Bei einem Modell 0. Ordnung entspricht die Störung δ_e genau der Veränderung der Empfängervariablen zum nächsten Iterationsschritt:

$$Y_{e,i+1} = Y_{e,i} + \delta_{e,i} \quad (5.11)$$

$Y_{e,i}$	Zustand der Variablen e nach der i -ten Iteration
$\delta_{e,i}$	Veränderung der Variablen e nach der i -ten Iteration

Abbildung 5.11 zeigt schematisch den Datenstrom bei der Beeinflussung einer Variablen.

Verlassen Variablen das vorgesehene Intervall ($Min; Max$) besteht die Möglichkeit, sie durch die Funktion $I(Y)$ in Gleichung (5.12) in das Intervall zu zwingen. Die Wahl des Intervallanteils, der

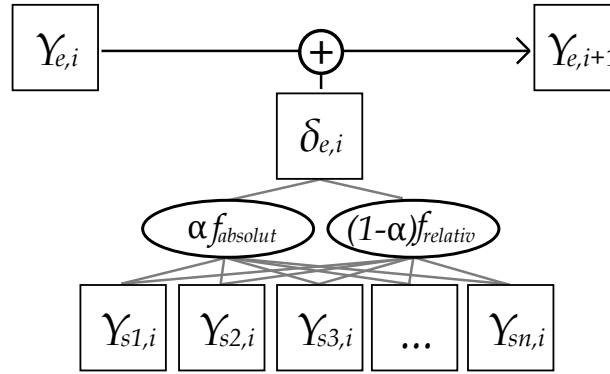


Abbildung 5.11: Iterationsschritt einer Variablen im Modell 0. Ordnung

durch seine Identität wiedergegeben wird, ist willkürlich auf 90% gesetzt. Die oberen und unteren 5% sowie außerhalb des Intervalls liegende Werte werden stetig innerhalb der Intervallgrenzen skaliert und konvergieren asymptotisch gegen die Grenzwerte.

$$\begin{aligned}
 &= \frac{Max \cdot e^{\frac{20Y}{Max}-1}}{20}, & falls \quad Y < \frac{1}{20}Max & \quad (5.12) \\
 I(Y) = Y, & & falls \quad \frac{1}{20}Max \leq Y \leq \frac{19}{20}Max & \\
 &= \left(1 - \frac{Max \cdot e^{19-\frac{20Y}{Max}}}{20}\right)Max, & falls \quad Y > \frac{19}{20}Max &
 \end{aligned}$$

Modell 1. Ordnung

Bei einem Modell 1. Ordnung spielen sich die Lagebewertungen und Veränderungen analog zum Modell 0. Ordnung auf der Ebene der 1. Ableitung ab:

$$\delta'_{s,abs} = \frac{Y'_s - \bar{Y}'_s}{\sqrt{Max'_s - Min'_s}} = \frac{Y'_s - 0}{\sqrt{1 - (-1)}} = \frac{Y'_s}{\sqrt{2}} \quad (5.13)$$

- Y'_s 1. Ableitung bzw. Steigung der Sender-Variablen
- \bar{Y}'_s Mittelpunkt des Definitionsintervalls für Ableitungen der Sendervariablen, $M'_s = 0$
- $\delta'_{s,abs}$ Absolute Lagebewertung der Steigung einer Sendervariablen
- Max'_s Obergrenze für Steigungen, wird aus numerischen Gründen mit 1 angenommen
- Min'_s Untergrenze für Steigungen, wird aus numerischen Gründen mit -1 angenommen

$$\delta'_{s,rel} = (Y'_s - Y'_e) \frac{\sqrt{(1 - Y'_s)(Y'_s + 1)(1 - Y'_e)(Y'_e + 1)}}{4} \quad (5.14)$$

- Y'_e 1. Ableitung bzw. Steigung der Empfängervariablen
- $\delta'_{s,rel}$ Relative Lagebewertung der Steigungen von Sender- und Empfängervariablen

$$\delta'_s = \alpha \phi \text{sgn}(\delta'_{s,abs}) \left| \delta'_{s,abs} \right|^\theta + (1 - \alpha) \phi \text{sgn}(\delta'_{s,rel}) \left| \delta'_{s,rel} \right|^\theta \quad (5.15)$$

δ'_s Wirkung einer Sender- auf die Steigung einer Empfängervariable

$$\delta'_e = \sum_{i=1}^n \delta'_{s,i} g_i \quad (5.16)$$

δ'_e Gesamtwirkung auf die Empfängervariable

Die Veränderung des Y-Wertes einer Variablen wird nicht nur wie bei einem Modell 0. Ordnung durch die Störung durch andere Variablen beeinflusst, sondern auch durch die Kontinuität der eigenen Steigung, der 1. Ableitung Y' . Das Maß für die Kontinuität ist der Modellparameter $0 \leq \gamma \leq 1$. Siehe Abbildung 5.12 und Gleichung 5.17. Zu beachten ist, daß die Kontinuität $Y'_{e,i}$ auf Ebene der 1. Ableitung, die Störung $\delta_{e,i}$ jedoch auf Ebene der Variablenwerte ermittelt wird.

$$Y_{e,i+1} = Y_{e,i} + \underbrace{\gamma Y'_{e,i}}_{\text{Kontinuität}} + \underbrace{(1 - \gamma) \delta_{e,i}}_{\text{Störung}} \quad (5.17)$$

Für die Berechnung der 1. Ableitung selbst stehen zwei unterschiedliche Aspekte einander gegenüber: Zum einen treibt die Summe aller Störungen aus anderen Variablen δ'_e die Bewegung von Y'_e an. Zum anderen ist die Ableitung Y'_e aber definiert als die Differenz zwischen einem Variablenwert $Y_{e,i}$ und seinem Nachfolger $Y_{e,i+1}$. Der Modellparameter $0 \leq \beta \leq 1$ steuert, wie stark die Auslenkung der Variablen auf Ebene der Ableitungen ($\beta \rightarrow 1$) oder auf Ebene des Modells 0. Ordnung basiert ($\beta \rightarrow 0$).

$$Y'^*_{e,i+1} = Y'_{e,i} + \delta'_{e,i} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} Y'^o_{e,i+1} &= Y_{e,i+1} - Y_{e,i} \\ &= Y_{e,i} + \gamma Y'_{e,i} + (1 - \gamma) \delta_{e,i} - Y_{e,i} \\ &= \gamma Y'_{e,i} + (1 - \gamma) \delta_{e,i} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} Y'_{e,i+1} &= \beta Y'^*_{e,i+1} + (1 - \beta) Y'^o_{e,i+1} \\ &= \beta (Y'_{e,i} + \delta'_{e,i}) + (1 - \beta) (\gamma Y'_{e,i} + (1 - \gamma) \delta_{e,i}) \\ &= \beta Y'_{e,i} + \beta \delta'_{e,i} + \gamma Y'_{e,i} + \delta_{e,i} - \gamma \delta_{e,i} - \beta \gamma Y'_{e,i} - \beta \delta_{e,i} + \beta \gamma \delta_{e,i} \\ &= \beta Y'_{e,i} + \gamma Y'_{e,i} - \beta \gamma Y'_{e,i} - (\beta \delta_{e,i} + \gamma \delta_{e,i} - \beta \gamma \delta_{e,i}) + \beta \delta'_{e,i} + \delta_{e,i} \\ &= (\beta + \gamma - \beta \gamma) (Y'_{e,i} - \delta_{e,i}) + \beta \delta'_{e,i} + \delta_{e,i} \end{aligned} \quad (5.20)$$

$Y'_{e,i}$ Zustand der Steigung der Variablen e nach der i-ten Iteration

β Verhältnis zwischen tatsächlicher Steigung und neu berechneter Steigung

γ Verhältnis zwischen Kontinuität der Steigung und Störung durch andere Variablen

Einfaches, schwach vernetztes Modell

Zunächst wird das in Abbildung 5.9 dargestellte Gefüge in verschiedenen Varianten simuliert. Im Gegensatz zu dem in den Abbildungen 5.10 und 5.21 dargestellten Wirkungsgefüge ist es nur schwach vernetzt. Abbildung 5.14 links zeigt die Verknüpfungen zwischen den Variablen von links nach rechts sowie die Startwerte. Sämtliche Startwerte haben den *neutralen Wert* 50% in einem Intervall (0%;100%), lediglich der Öffnungsgrad besitzt einen überdurchschnittlich hohen Wert von 60%. Die Variable Öffnungsgrad ist eine reine Sendervariable und ändert sich während der Simulation nicht. Baukosten und Robustheit sind gegen Veränderung gesperrt. Der Vernetzungsgrad in diesem Modell ist relativ gering, daher ist anzunehmen, daß es sich weitgehend deterministisch verhalten wird. Sämtliche Wirkungen sind entweder proportional oder reziprok, es gibt in diesem Modell keine extremalen und auch keine quadratisch beschleunigenden oder dämpfenden Wirkungen. Alle Wirkungsfaktoren haben zunächst den Wert $\phi = 1,0$. Die gezeigten Simulationen basieren auf numerischen Differentialgleichungen 2. Ordnung mit folgenden drei Modellparametern:

$$\alpha = 0,8 \quad \beta = 0,8 \quad \gamma = 0,4$$

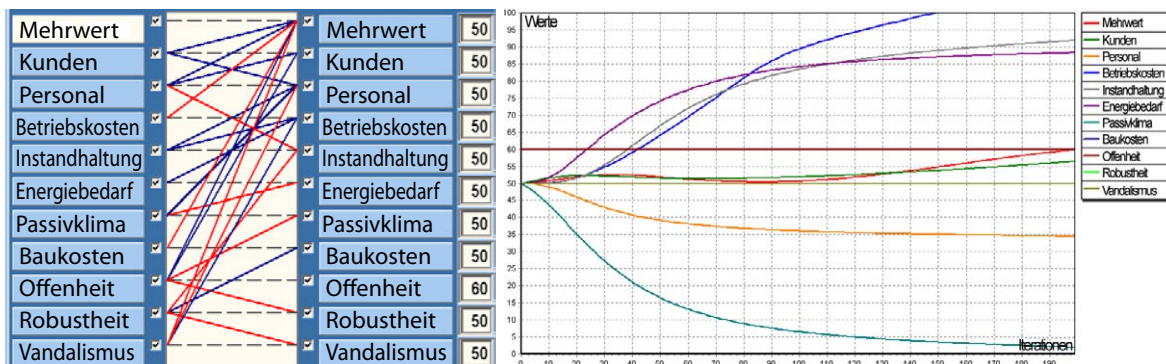


Abbildung 5.14: Wirkungsgefüge ServicePoint mit hohem Öffnungsgrad

Abbildung 5.14 rechts zeigt den Verlauf der ersten Simulation. Durch den hohen Öffnungsgrad sinken das passive⁷ Innenraumklima sowie die Zufriedenheit des Personals. Dementgegen steigen Energiebedarf, Instandhaltung und die Betriebskosten. Die Kunden scheint das nicht zu stören, ihre Zufriedenheit nimmt langsam zu. Der geschäftliche Mehrwert für den Betreiber der Servicepoints schwankt im positiven Bereich, entwickelt sich nach 100 Iterationen jedoch positiv. Die Werte nach der 200. Iteration sowie den Verlauf der Steigungen sämtlicher Variablen zeigt Abbildung 5.15.

Das Ergebnis scheint das tatsächliche Verhalten des realen Systems ServicePoint 1⁸ gut wiederzugeben: Der Öffnungsgrad ist sehr hoch, die Energiekosten und die Unzufriedenheit der Mitarbeiter

⁷ohne aktive Klimatisierung erreichbare

⁸Der erste Entwurf des ServicePoints ist seit vielen Jahren im Einsatz, wird aber derzeit durch ein sogenanntes Redesign ServicePoint 2, welcher im Abschnitt 6.1.2 beschrieben und im Abschnitt 6.2 simuliert wird

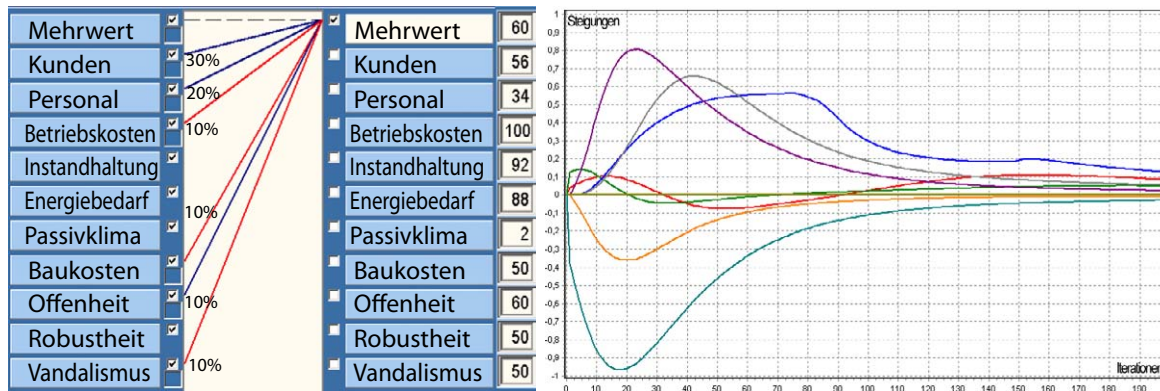


Abbildung 5.15: Endwerte und Steigungsverlauf des ersten Simulationsdurchgangs

steigen. Dennoch lohnt sich der Betrieb des ServicePoints für das System Bahn, da die Kunden zufrieden sind und der öffentliche Personenverkehr dadurch attraktiver. Allerdings besteht aufgrund steigender Energiepreise die Gefahr, daß der positive Nutzen durch die Kosten überkompensiert wird, und auch der Krankenstand der Mitarbeiter steigt. Die nächste Simulation bewertet daher den Einfluß der Betriebskosten auf den geschäftlichen Mehrwert stärker, und zwar mit einem Faktor $\phi = 2,0$. In diesem Fall zeigt Abbildung 5.16, daß der geschäftliche Mehrwert unterhalb des neutralen Wertes konvergiert.

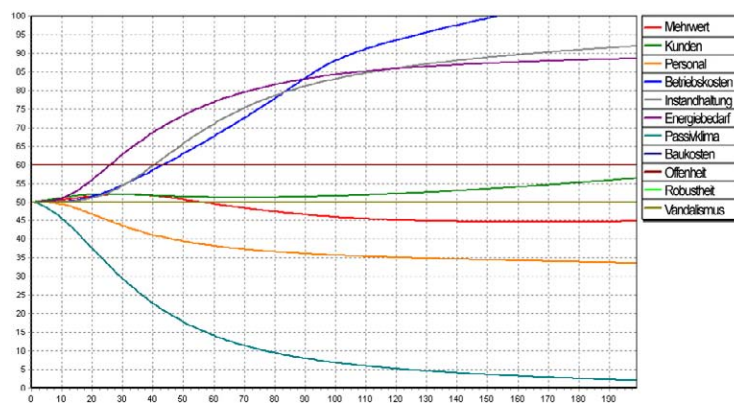


Abbildung 5.16: Stärkerer Einfluß des Energieverbrauchs und der Betriebskosten

Abgesehen vom geschäftlichen Mehrwert verhält sich das Modell ähnlich wie in der ersten Simulation. Da der ServicePoint aber unter diesen Randbedingungen eine insgesamt negative Bilanz für den Betreiber erwirtschaftet, müßte er entweder abgeschafft oder so verändert werden, daß der geschäftliche Mehrwert positiv ausfällt⁹. Eine Strategie könnte das teilweise Schließen des ServicePoints sein, mit dem Ziel, Energieverluste und Zuglufterscheinungen zu vermindern.

Abbildung 5.17 zeigt das modellhafte Systemverhalten bei einem Öffnungsgrad von nur 40%. Die

⁹als *positiv* werden alle Werte oberhalb des neutralen Wertes bezeichnet, in diesem Fall 50%. Werte unterhalb des neutralen Wertes werden als *negativ* bezeichnet, auch wenn der Zahlenwert über Null liegt

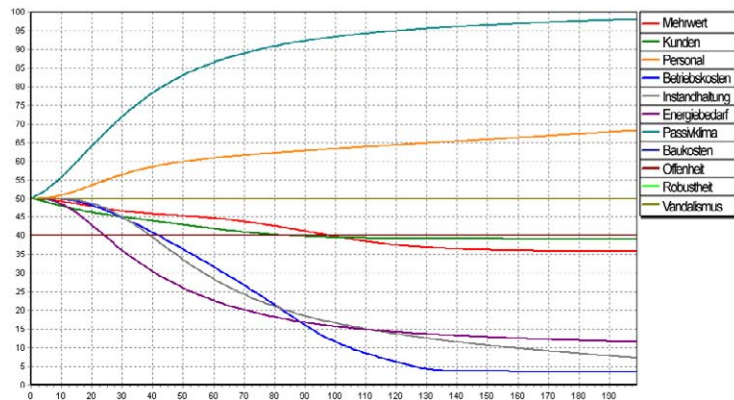


Abbildung 5.17: Verhalten eines überwiegend geschlossenen ServicePoints

Variablengruppe passives Klima und Personalfriedenheit auf der einen Seite sowie Energiebedarf, Instandhaltung und Betriebskosten ändern ihr Verhalten völlig. Es scheint fast so, als sei das Ergebnis die vertikale Spiegelung des Ergebnisses der vorangegangenen Simulation: Variablen, die sich vorher positiv entwickelten, sinken nun, und Variablen, die sich vorher negativ entwickelten, steigen nun. Leider gehört auch die Zufriedenheit der Kunden dazu, die nun nicht mehr positiv verläuft¹⁰. Trotz des umgekehrten Verhaltens fast aller beweglichen Variablen ändert sich ausgerechnet der geschäftliche Mehrwert nicht. Dieser sinkt auch in diesem Modell. Das liegt daran, daß sich ein positiver geschäftlicher Mehrwert erst dann einstellt, wenn sowohl Kunden als auch Personal zufrieden sind, und die Betriebskosten nicht höher sind als die Mehreinnahmen bei den Fahrscheinverkäufen, die der ServicePoint verursacht. Abbildung 5.18 zeigt die Endwerte und den Verlauf der Steigungen dieser Simulation, sowie eine gefilterte Darstellung der Wirkungen, die den geschäftlichen Mehrwert und die Kundenzufriedenheit beeinflussen.

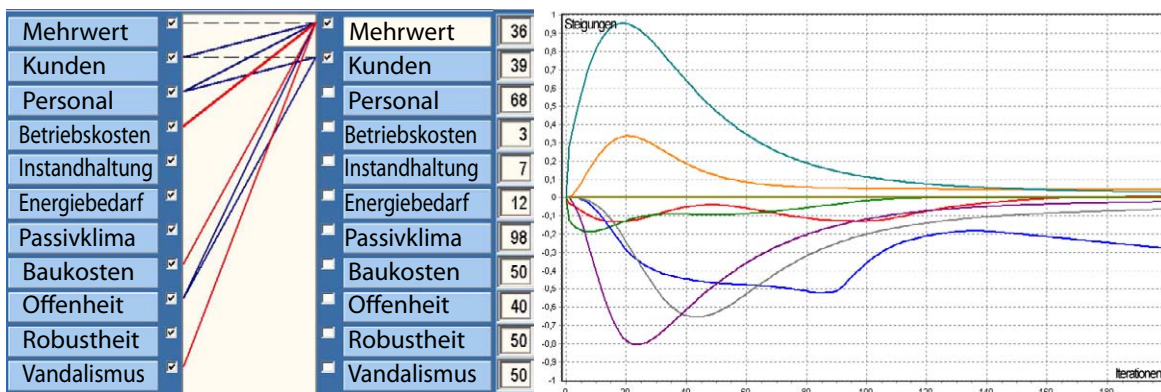


Abbildung 5.18: Endwerte und Steigungen bei einem geschlossenen ServicePoint

Da sowohl ein überdurchschnittlich offener als auch ein überdurchschnittlich geschlossener Ser-

¹⁰Da die Betriebskosten aus logischen Gründen nicht unter 0% fallen können, wurde bei dieser Simulation ein wie in Abschnitt 5.1.3 beschriebener numerischer Intervallzwang aktiviert.

vicePoint zu einem negativen Verhalten des geschäftlichen Mehrwertes führen, soll sich der Öffnungsgrad in der nächsten Simulationsvariante selbst regeln und dadurch optimiert werden. In Abhängigkeit der Personalfriedenheit und des passiv erreichbaren Innenraumklimas bzw. Energieverbrauchs wird der Öffnungsgrad des ServicePoints automatisch verändert.

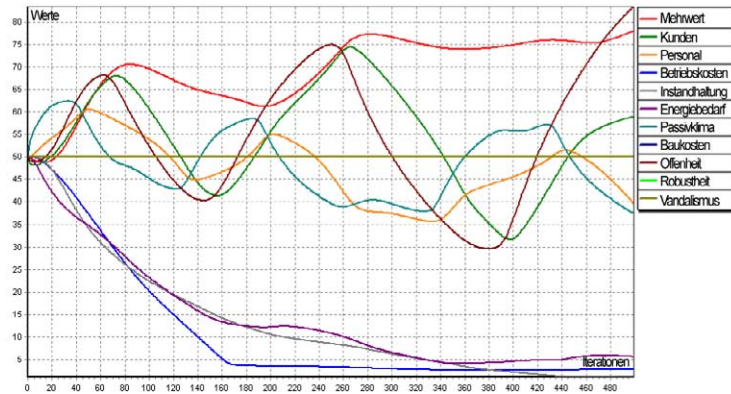


Abbildung 5.19: ServicePoint mit selbst regelndem Öffnungsgrad

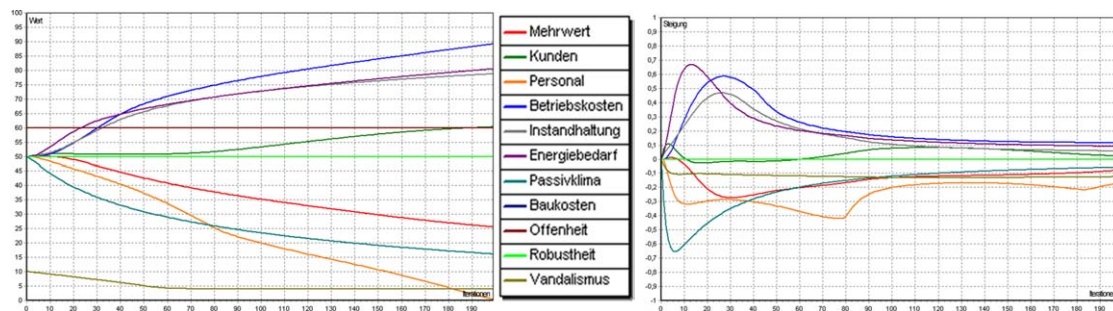


Abbildung 5.20: Werte und Steigungen des 1. Simulationsdurchgangs

Wie man in Abbildung 5.19 erkennen kann, schwingt der Öffnungsgrad mit steigender Amplitude. Zeitlich versetzt schwingt die Kundenzufriedenheit. Die Personalfriedenheit schwingt ebenfalls, allerdings mit sinkender Tendenz. Sehr gut entwickelt sich der geschäftliche Mehrwert, der durch diese Methode offensichtlich tatsächlich optimiert wird. Allerdings kann das Wirkungsgefüge die Schwingungen nicht unendlich fortsetzen, da aufgrund der größer werdenden Amplitude das Modell irgendwann an seine Intervallgrenzen stößt oder divergiert.

Stark vernetztes Modell

Im folgenden Abschnitt werden Simulationen des von Studierenden des Seminars „Wohlfühlbahnhof“ an der TU Darmstadt entwickelten stark vernetzten Wirkungsgefüges gezeigt und diskutiert. Eine graphische Darstellung der Wirkungen zeigt Abbildung 5.10. Die Variablen Baukosten und Öffnungsgrad sind reine Sendervariablen und ändern ihre zu Beginn der Simulation festgelegten

Werte nicht. Da bei diesem Modell Extremalwirkungen die Variable Vandalismus beeinflussen, Vandalismus aber nur einseitig definiert ist¹¹, wird der *neutrale Wert* nicht auf den Intervallmittelpunkt 50%, sondern auf 10% gesetzt. Die Modellparameter α, β und γ zeigen beste Resultate bei folgender Einstellung:

$$\alpha = 0,8 \quad \beta = 0,3 \quad \gamma = 0,4$$

Abbildung 5.20 zeigt den Verlauf des ersten Simulationsdurchgangs mit 200 Iterationen. Das Modell startet ähnlich wie das schwach vernetzte Modell aus Abbildung 5.9. Auffällig ist, daß die Variable *Vandalismus* stetig fällt, es entsteht also ein negativer Vandalismus, der für ein reales System nicht logisch nachvollziehbar ist. Hier liegt also ein Fehler in der Modellannahme des Wirkungsgefüges vor, der sich in einem selbstverstärkenden Kreislauf äußert: Vandalismus wird ständig durch die *mittleren* Werte von Baukosten, Robustheit und Offenheit nach unten korrigiert. Er würde erst bei einer sehr schlechten Kundenzufriedenheit wieder zunehmen, was hier nicht der Fall ist. Um den Vandalismus im sinnvollen Bereich zu halten, wurde bei der Simulation für diese Variable eine Intervallbeschränkung aktiviert.

Im zweiten Durchgang wurde die Trägheit der Variable Vandalismus erhöht, um dem selbstverstärkenden Regelkreis seine dominante Wirkung zu nehmen, ohne das Modell grundsätzlich zu ändern. Gleichzeitig wurde der Öffnungsgrad wie in der dritten Simulation des einfachen Modells auf 40% reduziert. Das Ergebnis wird in Abbildung 5.21 dargestellt. Die Personalzufriedenheit entwickelt sich in diesem Modell noch stärker positiv als beim einfachen Modell, was an dem positiven Einfluß des absolut minimalen Vandalismus liegt. Ein stärkerer Vandalismus könnte durch eine schlechte Personal- und Kundenzufriedenheit ausgelöst werden. Da die Kundenzufriedenheit nur schwach negativ, die Personalzufriedenheit aber stark positiv ausgeprägt ist, liegt hier ein selbstverstärkender Regelkreis vor.

Ein weiterer Auslöser für Vandalismus wird in der nächsten Simulation untersucht: Vandalismus tritt häufig dann auf, wenn technische oder bauliche Einrichtungen besonders teuer oder besonders billig, besonders robust oder besonders labil sind. Daher kommen hier Extremalwirkungen zum Einsatz: Abbildung 5.22.

Bei einem Variablenwert für Baukosten von nur 20% entwickelt sich zunächst nur die Personalzufriedenheit signifikant negativ. Der Vandalismus steigt schwach an, schlägt ab einem bestimmten Zeitpunkt aber schlagartig um auf Werte über 85%, wo er stationär wird. Solch ein Verhalten ist ebenfalls in der Wirklichkeit beobachtbar. Serviceeinrichtungen ohne starke sichtbare Schäden fallen in der Regel nicht Vandalismus zum Opfer. Potentielle Vandalen haben hier eine gewisse Hemmschwelle, möglicherweise auch aus Angst vor Strafverfolgung. Zerstörungen sind in diesem Stadium nur verdeckt und relativ klein. Erst wenn die Serviceeinrichtung bereits einen gewissen Eindruck der Verwahrlosung macht, nimmt die Zerstörung stark zu. Die Hemmschwelle, einem bereits beschädigten Objekt weitere Schäden zuzufügen liegt wesentlich tiefer als bei neuwertigen Objekten. Ist das Objekt erst einmal zerstört, sinkt das Interesse daran, dem Objekt weitere Schäden hinzuzufügen.

¹¹ *neutral* ist der Zustand, wenn *kein* Vandalismus vorherrscht. 50% Vandalismus ist bereits negativ zu beurteilen. Vandalismus jenseits des neutralen Wertes, also negative Zerstörung, gibt es nicht, da es in der Realität nicht vorkommt, daß Dritte spontan Serviceeinrichtungen instandhalten und reparieren

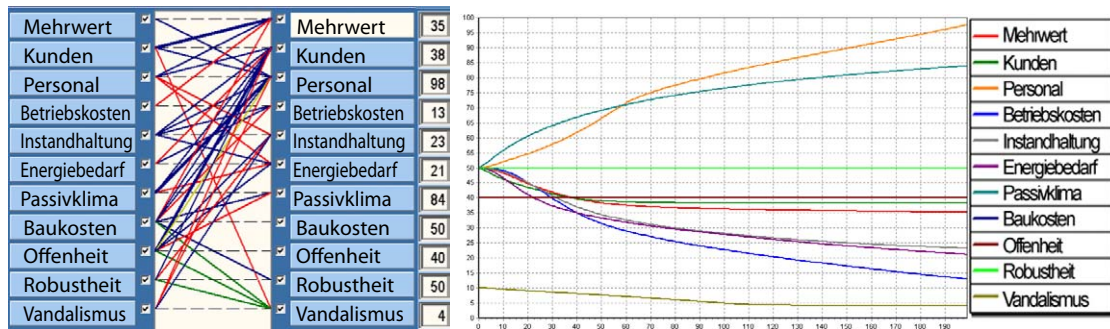


Abbildung 5.21: Stark vernetztes Modell mit niedrigem Öffnungsgrad

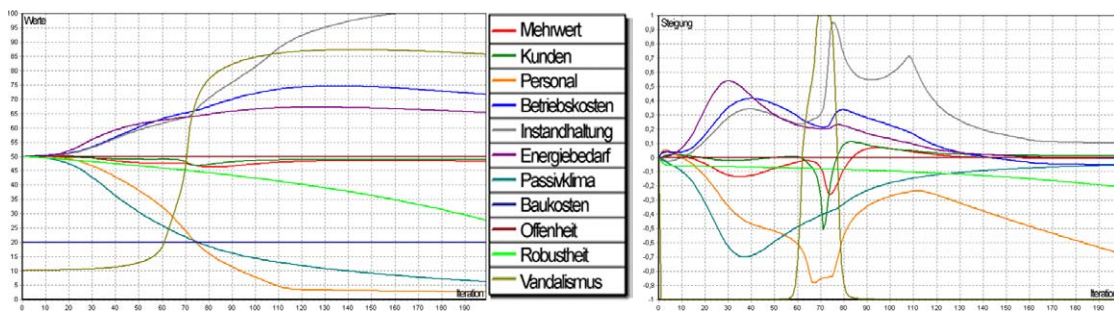


Abbildung 5.22: Simulationen eines 'billigen' ServicePoints

Auch für dieses stark vernetzte Modell wird im letzten Durchgang eine Selbstregelung des Öffnungsgrades in Abhängigkeit der Personalfriedenheit und des Energieverbrauchs ergänzt. Diesmal pendeln alle beweglichen¹² Variablen, selbst der Vandalismus pendelt träge auf niedrigem Niveau. Die Amplitude der Pendelausschläge nimmt in diesem Fall nicht zu, stattdessen wird zu Beginn die Frequenz erhöht. Der geschäftliche Mehrwert liegt durchgehend im positiven Bereich. Durch die gewählten Wirkungen, Bewertungen und Gewichte wird also ein dynamisches Gleichgewicht erreicht. Der Öffnungsgrad des ServicePoints wird zyklisch so verändert, daß sich insgesamt

¹²Wirkungen empfangende und nicht gesperrte

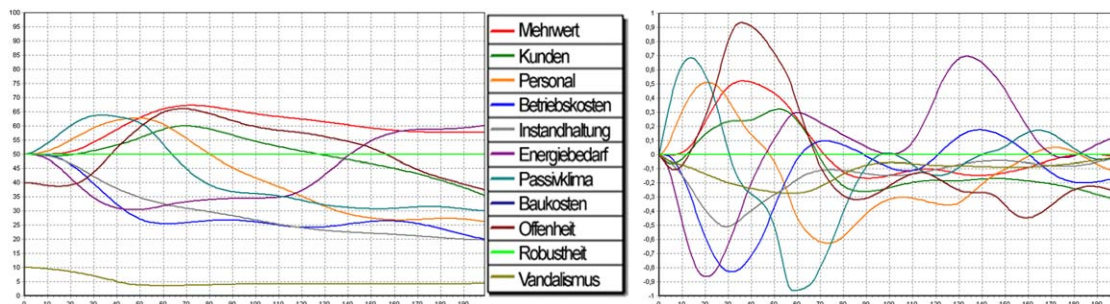


Abbildung 5.23: Simulationen einer Selbstreglung des Öffnungsgrades nach 200 Iterationen

ein positiver geschäftlicher Mehrwert einstellt und sich die Zufriedenheit der Kunden und Mitarbeiter nie zu lange im negativen Bereich befindet. In der Praxis könnte das so aussehen, daß der Öffnungsgrad des ServicePoints mechanisch oder durch Luftschleieranlagen veränderbar ist und in Abhängigkeit des Kundenandrangs, der Luftgeschwindigkeit, der Temperatur, der Uhrzeit oder des Wohlbefindens der Mitarbeiter gesteuert wird.

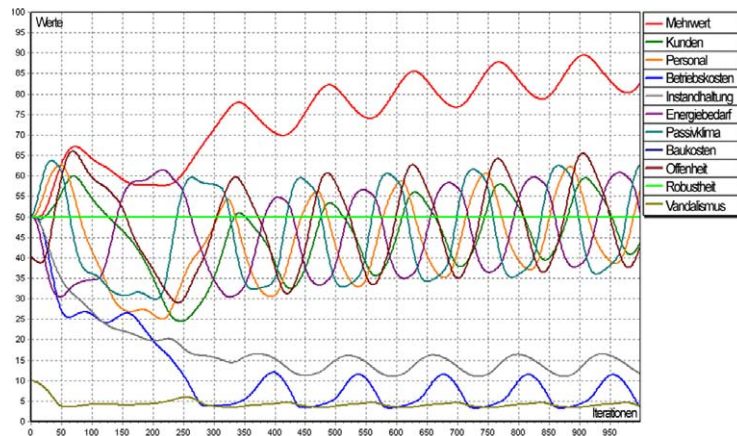


Abbildung 5.24: WG/Simulationen einer Selbstreglung des Öffnungsgrades nach 1000 Iterationen

5.2.1 Auswertung

Simulationen von Wirkungsgefügen eignen sich sehr gut dazu, ein Gefühl für die inneren kausalen Zusammenhänge von Systemen zu entwickeln. Sie sind jedoch weniger dazu geeignet, quantitative Prognosen für das Verhalten von Systemen zu erstellen. Dazu sind die Modelle zu willkürlich und variieren ihr Verhalten zu stark allein durch die Änderung der numerischen Parameter wie α , β und γ . Allerdings sind gerade die vermeintlichen Fehlversuche aufschlußreich, bei denen die Modelle divergieren oder unrealistische Werte annehmen, da durch die Suche nach geeigneten Wirkungen, Gewichten und Parametern ein Verständnis für die inneren Zusammenhänge entsteht. Sobald ein Modell gefunden ist, welches sich entsprechend der Erfahrungen aus der Wirklichkeit verhält, können durch leichte Variationen der Modellwerte und -wirkungen Schlüsse gezogen werden, wie sich das entsprechende System unter anderen Bedingungen verhalten würde.

Die Simulationen von Wirkungsgefügen zeigen aber vor allem, daß es sinnvoll ist, Systeme mit selbstregulierenden Mechanismen auszustatten. Dadurch können Systemstörungen automatisch aufgefangen und divergierende Verhaltensweisen aufgrund einseitiger Systemrückkopplungen vermieden werden.

6 Simulation thermodynamischer Vorgänge

6.1 Modellierung

Im folgenden Abschnitt werden die numerischen Gebäudemodelle beschrieben, die mit den in Abschnitt 3.7 beschriebenen Softwarepaketen *DK-Solar* und *Fluent* simuliert worden sind. Da die detailgetreue thermodynamische Simulation kompletter Bahnhöfe sowohl die zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten sprengen als auch die numerische Stabilität der Software ins Wanken bringen würde, habe ich die Bereiche Verkehrsstation, Empfangsgebäude sowie Detailbereiche getrennt modelliert und simuliert.

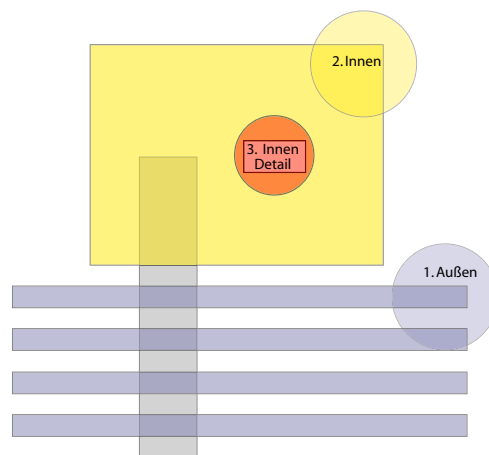


Abbildung 6.1: Aufteilung des Bahnhofs in drei Modelle

Die Verkehrsstation wird durch den Bahnsteigbereich in Köln Messe/Deutz repräsentiert und ist vorwiegend dem Außenbereich zuzuordnen. Das Empfangsgebäude aus Darmstadt steht Pate für halboffene Innenbereiche. Als Detailuntersuchungen werden der ortsunabhängige Entwurf des neuen ServicePoints sowie das Reisezentrum in Frankfurt Main Hbf beschrieben und simuliert, siehe Abbildung 6.2.

6.1.1 Thermisch dynamisches Gebäudemodell

Ziel der Erzeugung der im Folgenden vorgestellten Mehrzonenmodelle ist das Aufzeigen des energetischen Verhaltens von Bahnhöfen über Zeiträume von mehreren Tagen bis zu ganzen Jahren.

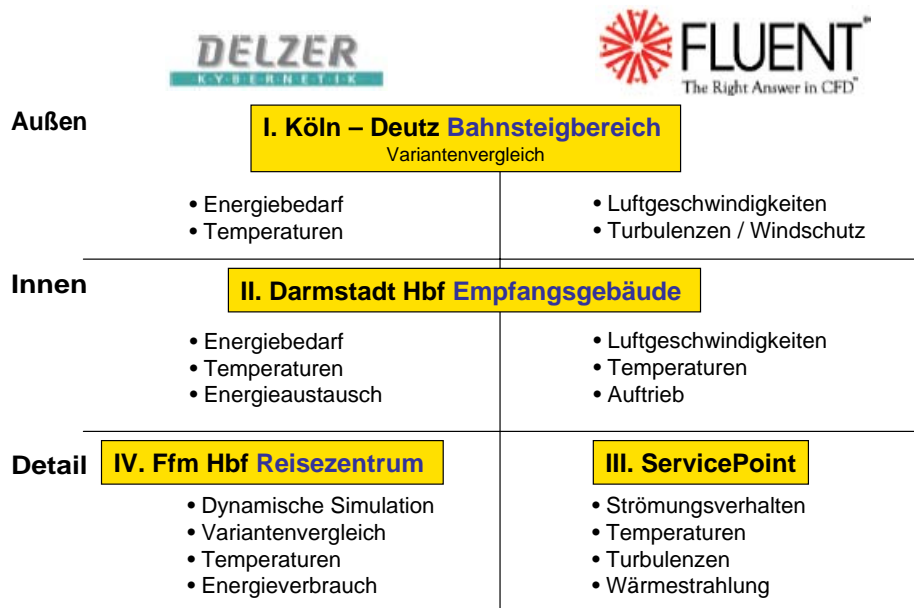


Abbildung 6.2: Mit DK-Solar und Fluent simulierte Gebäudemodelle

Dabei wird jeweils der Bahnhof im Bestandszustand modelliert sowie einige zu untersuchende Varianten. Die Modelle sind im Rahmen des Seminars „Wohlfühlbahnhof“ entstanden und in einer eigens von mir dafür entwickelten grafischen Modellierungsumgebung erstellt worden.

Verkehrsstation Köln Messe/Deutz

Die Verkehrsstation in Köln Messe/Deutz besteht aus einem höhergelegenen Teil für den Regionalverkehr und Thalys sowie zwei tieferliegenden Bahnsteigen für den ICE-Verkehr. Bei dieser Betrachtung geht es um die oben liegenden Bahnsteige. Bei der numerischen Modellierung einer Verkehrsstation, die aus mehreren gleichartigen, parallel nebeneinanderliegenden Bahnsteigen besteht, genügt es, einen einzigen Bahnsteig zu modellieren und später in der Simulation Spiegelachsen zu setzen.

Auf den Fotos in Abbildung 6.3 erkennt man rechts oben eine Luftaufnahme des Empfangsgebäudes und der Regional-, Thalys- und S-Bahnsteige. Am linken Rand des Fotos ist das Ende des darunterliegenden ICE-Bahnsteiges zu sehen. Das Foto links daneben ist eine Bahnsteigaufnahme aus der menschlichen Perspektive. Die beiden unteren Fotos zeigen rechts den Ausgang aus dem Fußgängertunnel und links eine Wartebox.

Abbildung 6.4 zeigt die Struktur und baulichen Elemente des Bahnsteigs im Bestand. Der Zugang erfolgt über einen eingehausten Ausgang am Ende des Bahnsteigs, der in den Personentunnel zwischen Empfangsgebäude und Verkehrsstation mündet. Der Bahnsteig ist weitgehend überdacht, tatsächlicher Wetterschutz besteht aber nur in einer kleinen Wartebox auf dem Bahnsteig, die zur Hälfte auch als Aufsichtsraum benutzt wird.



Abbildung 6.3: Fotografische Aufnahmen der Verkehrsstation Köln Messe/Deutz

Der Entwurf sieht vor, jeweils anderthalb Meter von der Bahnsteigkante entfernt eine Glasfassade zwischen Boden und Bahnsteigdach zu installieren, so daß auf dem gesamten Bahnsteig ausreichender Witterungsschutz und ein gemäßigtes Innenraumklima herrschen. Ob das tatsächlich der Fall sein würde, sollen die Simulationen in Abschnitt 6.2 zeigen. Grund für diesen Entwurfsvorschlag sind

- der mangelhafte Komfort beim Warten im Außenbereich, insbesondere durch Zugluft
- die nicht ausreichenden Kapazitäten der kleinen Wartebox
- die zu langen Wege zwischen Wartebox und den Waggontüren auf der gesamten Zuglänge

Neben den noch zu klärenden energetischen und finanziellen Folgen sind vor allem folgende kritische Aspekte zu beachten:

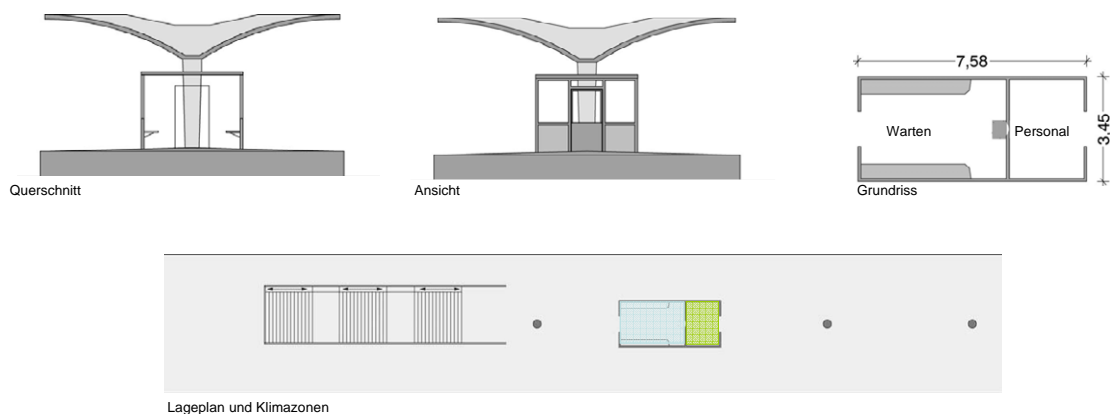


Abbildung 6.4: Bahnsteig Köln Messe/Deutz Bestand

- unterschiedliche Achs- und Türabstände verschiedener Waggongattungen
- daraus resultierend Türabstände der Halle und Schließautomatik
- Gefahrenpotential bei Zugeinfahrt für außerhalb der Glasfassade wartende Personen

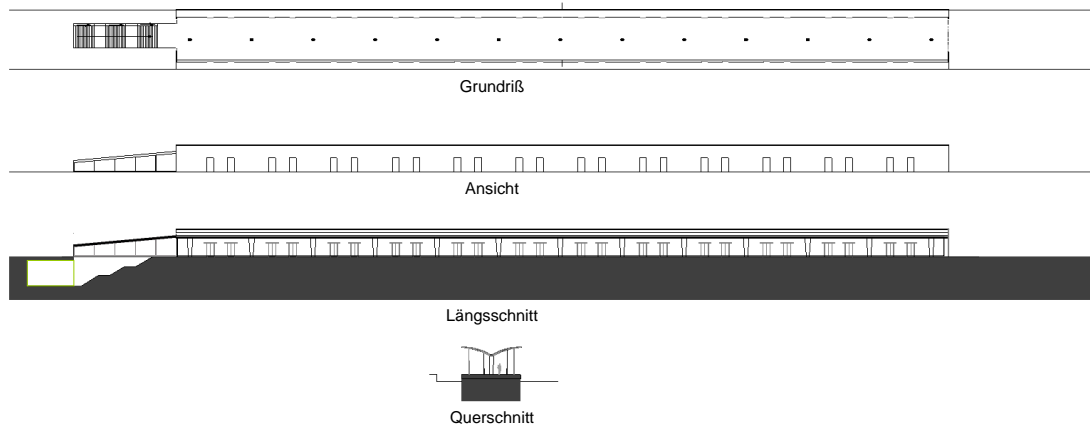


Abbildung 6.5: Bahnsteig Köln Messe/Deutz Entwurf

Die Modelle für die dynamische Gebäudesimulation sehen wie folgt aus: Im Bestand gibt es eine Raumzone, die Wartebox, die von Außenraum umgeben ist. Das Entwurfsmodell besteht wie in Abbildung 6.6 aus drei Klimazonen, dem Fußängertunnel, dem Aufgang und dem mit Glas eingehausten Bahnsteigbereich.

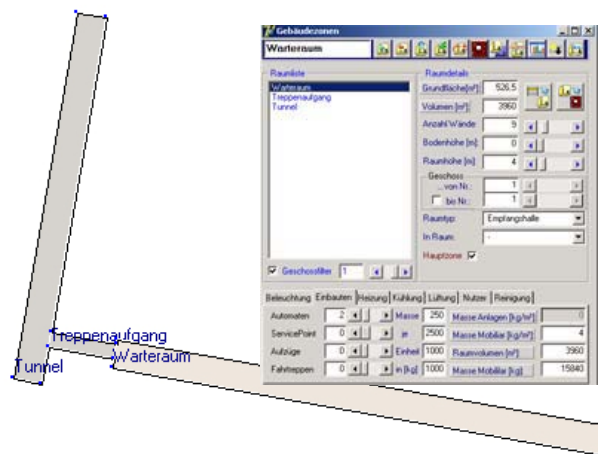


Abbildung 6.6: Dreizonenmodell des Entwurfs einer gläsernen Bahnsteigeinhausung

Empfangsgebäude Darmstadt Hbf

Abbildung 6.7 zeigt eine vereinfachte Darstellung der horizontalen Struktur des Darmstädter Hauptbahnhofs. Die Bahnsteige und Gleise liegen eine Ebene tiefer als das Empfangsgebäude

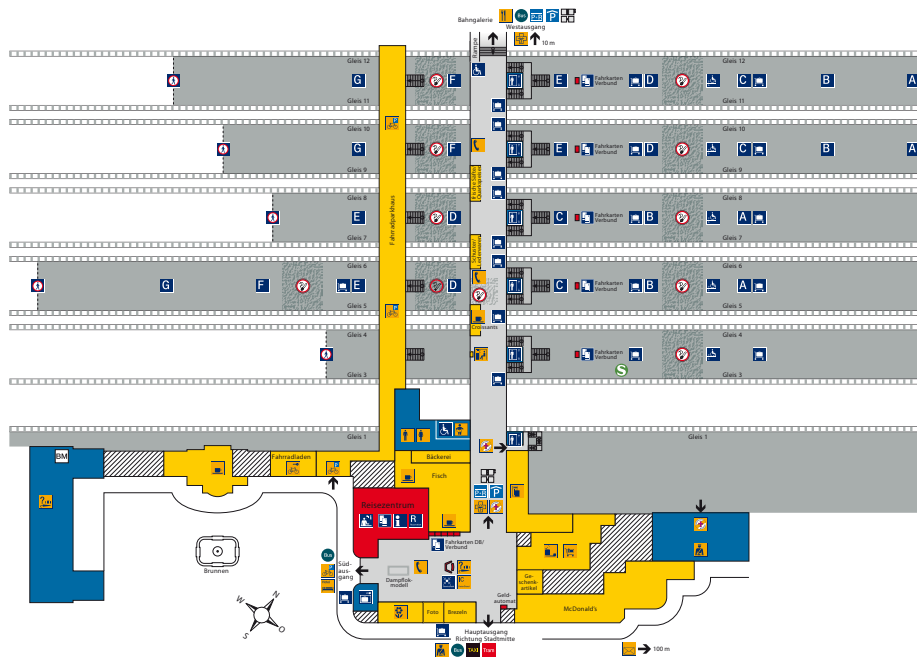


Abbildung 6.7: Prinzipskizze des Darmstädter Hauptbahnhofs[119]

und der Stadtverkehr. Der Querbahnsteig ist ebenerdig von der Empfangshalle aus zu erreichen, die Gleise liegen unterhalb des Querbahnsteigs. Die dreidimensionale Skizze 6.8 verdeutlicht die geometrische Konstellation des Gebäudekomplexes.

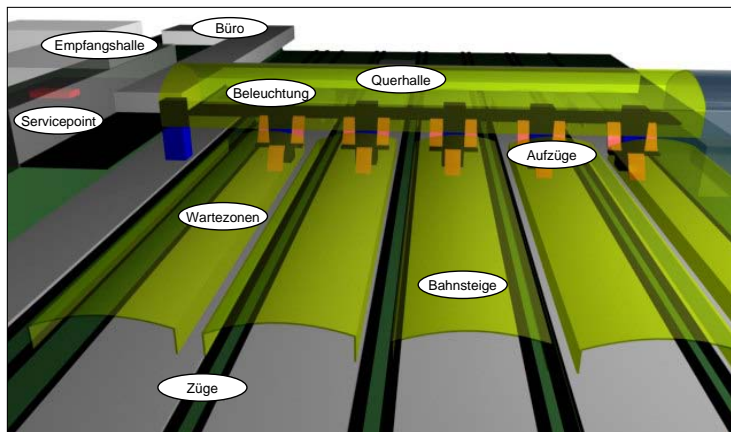


Abbildung 6.8: Skizzenhafte Darstellung des Darmstädter Hbf aus Richtung Norden

Die Abbildungen 6.9 und 6.10 zeigen maßstabsgetreu Grundriß und Aufriß des Empfangsgebäudes. Die Innenraumsimulation bezieht sich auf das Empfangsgebäude des Darmstädter Hauptbahnhofs, welches aus einer zentralen Halle und umliegend angeordneten Geschäften besteht, siehe

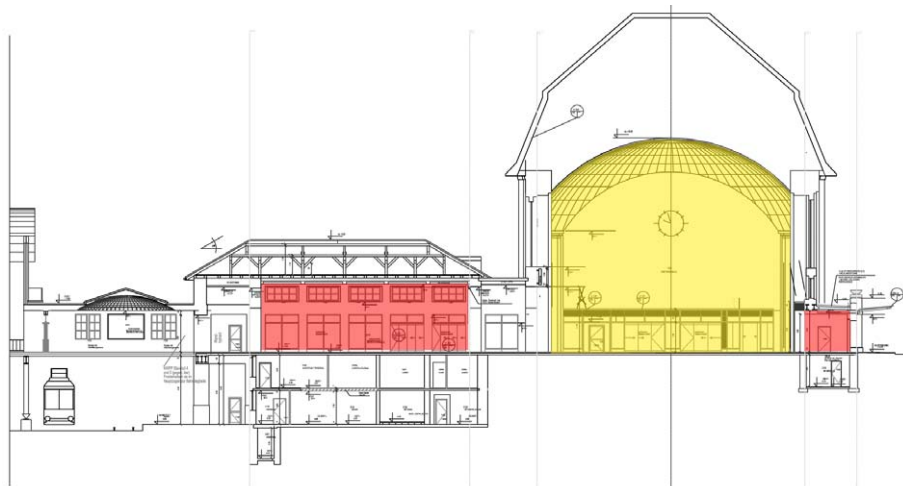


Abbildung 6.9: Vertikaler Querschnitt des Empfangsgebäudes Darmstadt Hbf

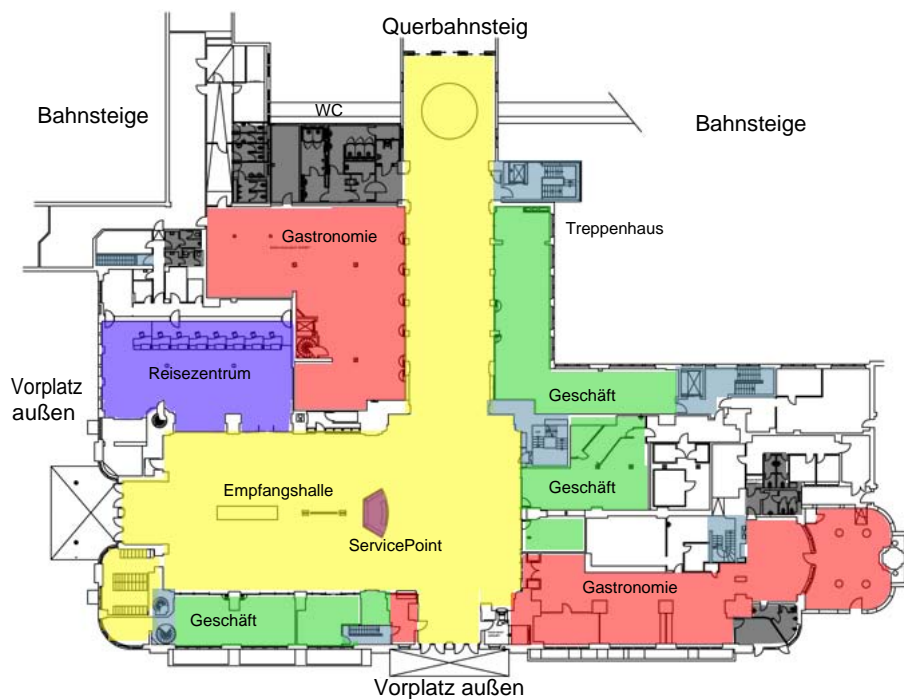


Abbildung 6.10: Grundriß des Empfangsgebäudes Darmstadt Hbf

Abbildung 6.11. Das Mehrzonenmodell besteht aus sieben verschiedenen Klimazonen, sechs davon wie in Abbildung 6.12 auf Erdgeschoßebene verteilt. Die siebte Zone ist der obere Hallenraum und befindet sich ohne bauliche Trennung direkt oberhalb der Raumzone *unterer Hallenbereich*.

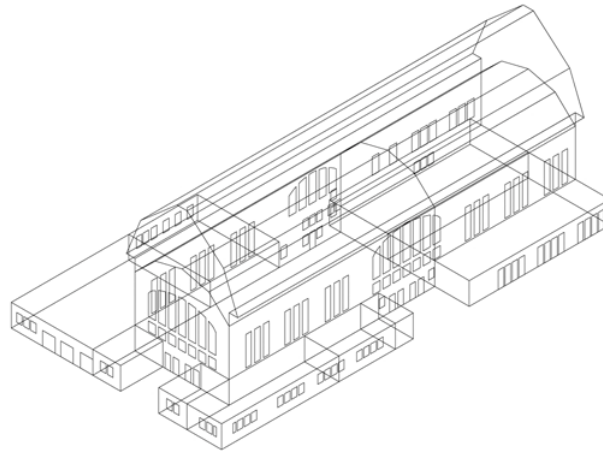


Abbildung 6.11: Isometrie des Empfangsgebäudes Darmstadt Hbf

Reisezentrum Frankfurt am Main Hbf

Das Reisezentrum im Frankfurter Hauptbahnhof liegt im Empfangsgebäude und hat zwei über Eck liegende Zugänge, einen zum Querbahnsteig und einen zur Empfangshalle. Über dem Reisezentrum befinden sich an einer offenen Galerie die Wartebereiche der 2. Klasse, die 1. Klasse Lounge sowie die Büros des Bahnhofmanagements.

Aufgrund der Temperaturgefälle zwischen Empfangshalle, Reisezentrum, 1. Klasse Lounge und Querbahnsteig und der Geometrie der Öffnungen kommt es im Reisezentrum zu erheblichen Zuglufterscheinungen, sehr zum Leid der dort beschäftigten Mitarbeiter. Der Effekt der querströmenden Luft ist besonders stark, wenn beide horizontalen Zugänge gleichzeitig geöffnet sind.

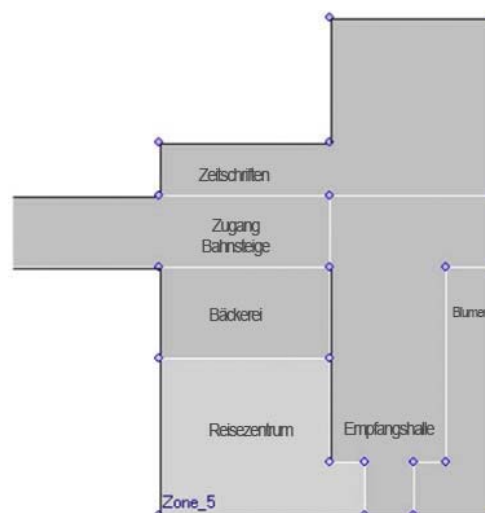


Abbildung 6.12: Klimazonen auf Erdgeschoßebene im Empfangsgebäude des Darmstädter Hbf

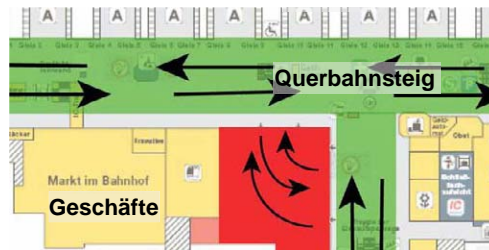


Abbildung 6.13: Räumliche Situation des Reisezentrums im Hauptbahnhof Frankfurt am Main

Daher sieht die Entwurfsvariante vor, auf den Zugang auf der Seite der Empfangshalle durch eine Pufferzone zu ersetzen. Dieser ist violett in Abbildung 6.14 eingezeichnet.

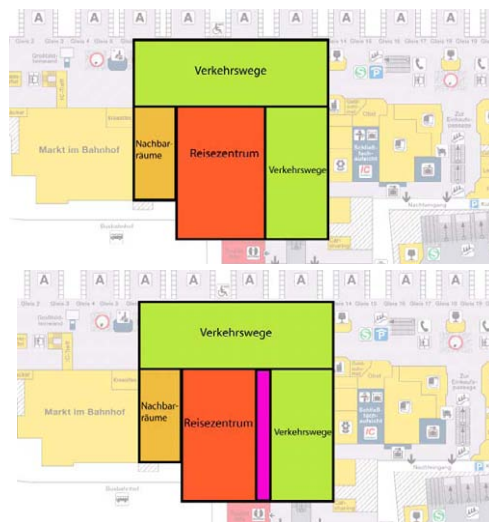


Abbildung 6.14: Prinzipskizze der Bestands- und Entwurfssituation des Reisezentrums

In dem Schleusenbereich sollen wie bisher an derselben Stelle Informationsmaterial mit Angeboten und Zugverbindungen ausliegen, Fahrpläne aushängen und Fahrscheinautomaten aufgestellt werden. In der Entwurfssituation müssen drei statt nur zwei Türen gleichzeitig geöffnet sein, damit sich die unerwünschte Zuglufterscheinung einstellt.

6.1.2 Strömungsmechanisches Modell

Im folgenden Abschnitt werden die mit der Software GAMBIT für die Simulation in FLUENT erstellten Modelle vorgestellt und diskutiert.

Verkehrsstation Köln Messe/Deutz

Beispielhaft für den Außenbereich einer Verkehrsstation wurde auch hier der Bahnsteigbereich in Köln Messe/Deutz gewählt. Die Simulationen mit der Software Fluent dienen *nicht* dazu, die Ergebnisse der Simulationen mit DK-Solar zu bestätigen oder zu verwerfen. Die beiden Simulationsmethoden haben wie in Abschnitt 3.7 beschrieben völlig unterschiedliche Konzepte, Methoden und Ziele, so daß sie einander ergänzen und nicht konkurrieren.

Für die Strömungssimulation habe ich einen halben, d.h. in der Längsachse geschnittenen Bahnsteig modelliert und vernetzt, der durch die Wahl von Spiegel- und Symmetrieachsen als eine Aneinanderreihung ganzer Bahnsteige simuliert werden kann. Abbildung 6.15 zeigt dieses Netz aus Richtung Aufgang, Abbildung 6.15 in der gerenderten Ansicht.

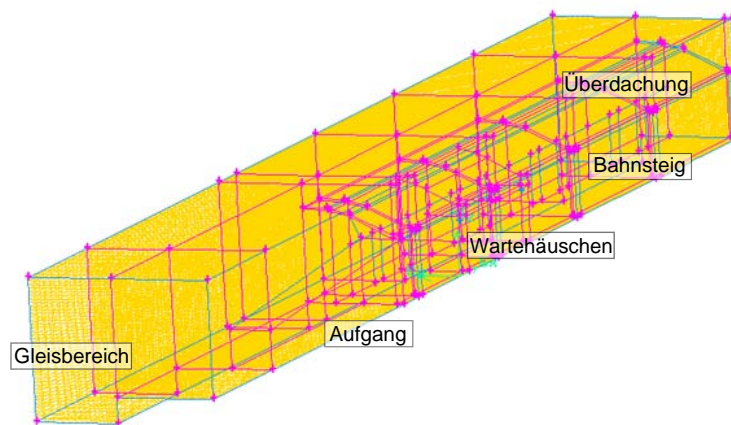


Abbildung 6.15: Netz eines halben Bahnsteiges in Köln Messe/Deutz



Abbildung 6.16: Gerenderte Darstellung des Bahnsteigmodells im Bestand

Empfangsgebäude Darmstadt Hbf

Das Netzmodell des Empfangsgebäudes umfaßt die Innenkubatur der Empfangshalle und der Zugänge, sowie die Einbauten ServicePoint, Fahrplanvitrine und Vitrine des Dampflokmodells. Abbildung 6.18 zeigt das Gittermodell der Empfangshalle, Abbildung 6.19 das gerenderte Gittermodell aus Sicht Südost bzw. Nord.

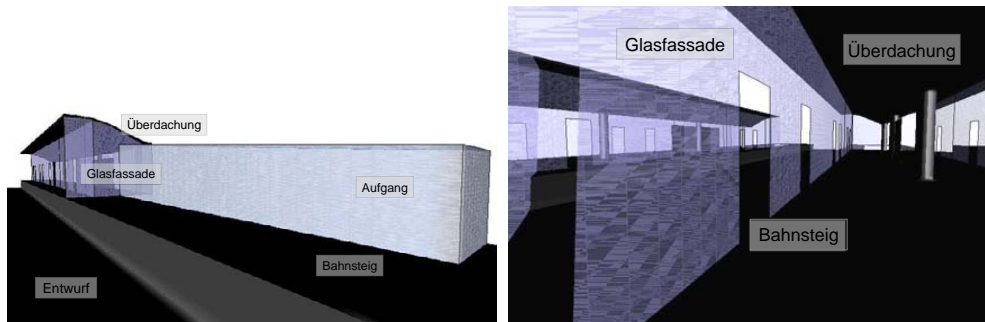


Abbildung 6.17: Gerenderte Darstellung des Netzes der Entwurfsvariante

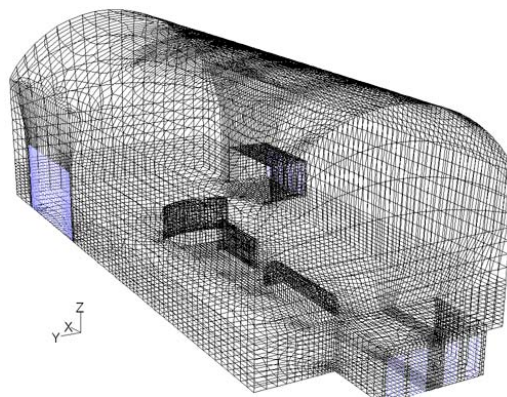


Abbildung 6.18: Gittermodell der Empfangshalle Darmstadt Hbf

Redesign ServicePoint

Die Detailuntersuchung mit der Strömungssimulation findet nicht am Modell des Reisezentrums sondern am Neuentwurf des ServicePoints statt. Der Grund liegt zum einen darin, daß wie in Abschnitt 5.1.2 erläutert der Energieverbrauch und die Komforteinbußen aufgrund von Zugluft bei ServicePoints besonders hoch ist, und der enorme thermische Auftrieb und damit verbundene Luftaustausch nur mit Strömungssimulation und nicht mit dynamischer Gebäudesimulation nachempfunden werden kann. Auf der anderen Seite ist die geometrische Beschaffenheit des Reisezentrums so aufwendig, daß eine detailgetreue dreidimensionale und vernetzte Nachbildung den Rahmen dieser Arbeit und die zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten sprengen würde.

Abbildung 6.20 zeigt einen ServicePoint im Bestand. Die „alten“ ServicePoints sind nach vorne und teilweise seitlich offen. Oberhalb der Frontöffnung sind nach innen gerichtete Wärmestrahler installiert, die bei kalter Umgebungsluft die operative Temperatur erhöhen, allerdings auch für Strahlungsasymmetrien sorgen.

Die Grafiken in Abbildung 6.1.2 zeigen den Neuentwurf des ServicePoints. Die Öffnungsfläche nach außen ist deutlich reduziert, da sowohl die Seiten als auch der Bereich oberhalb der Kopfhöhe durch eine Blende geschlossen ist. Die Erwärmung des Innenraums erfolgt jedoch nicht mehr

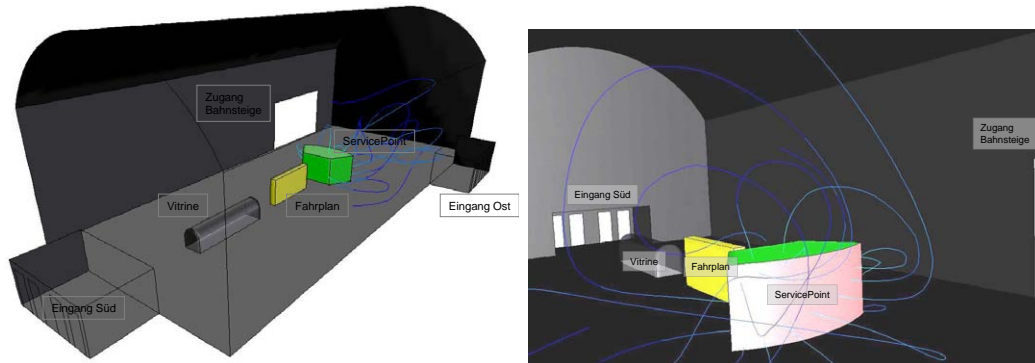


Abbildung 6.19: Innenraummodell der Empfangshalle Darmstadt Hbf



Abbildung 6.20: Foto eines ServicePoints im Bestand

über Wärmestrahler, sondern das Durchströmen mit warmer Luft, die im hinteren Teil des ServicePoints von außen angesaugt wird, im Boden erwärmt und um den Fußbereich eingelassen wird. Durch den natürlichen Auftrieb umströmt die warme Luft den gesamten Körper des Mitarbeiters und entweicht durch die Öffnung bzw. sammelt sich hinter der Blende unter der Decke.

Das gerenderte Netzmodell der Strömungssimulation ist in Abbildung 6.22 dargestellt.

6.2 Ergebnisse thermodynamischer Simulationen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der dynamischen Gesamtgebäude- und Strömungssimulation beschrieben.

6.2.1 Bahnsteig in Köln-Deutz

Die dynamischen, thermischen Simulationen vergleichen Jahres- und Wochentemperaturverläufe der Bestands- und Entwurfsvariante mit aktiver und passiver Temperierung. Die Auswahl der vergleichenden Simulationsvarianten ist strukturiert in Abbildung 6.23 dargestellt.

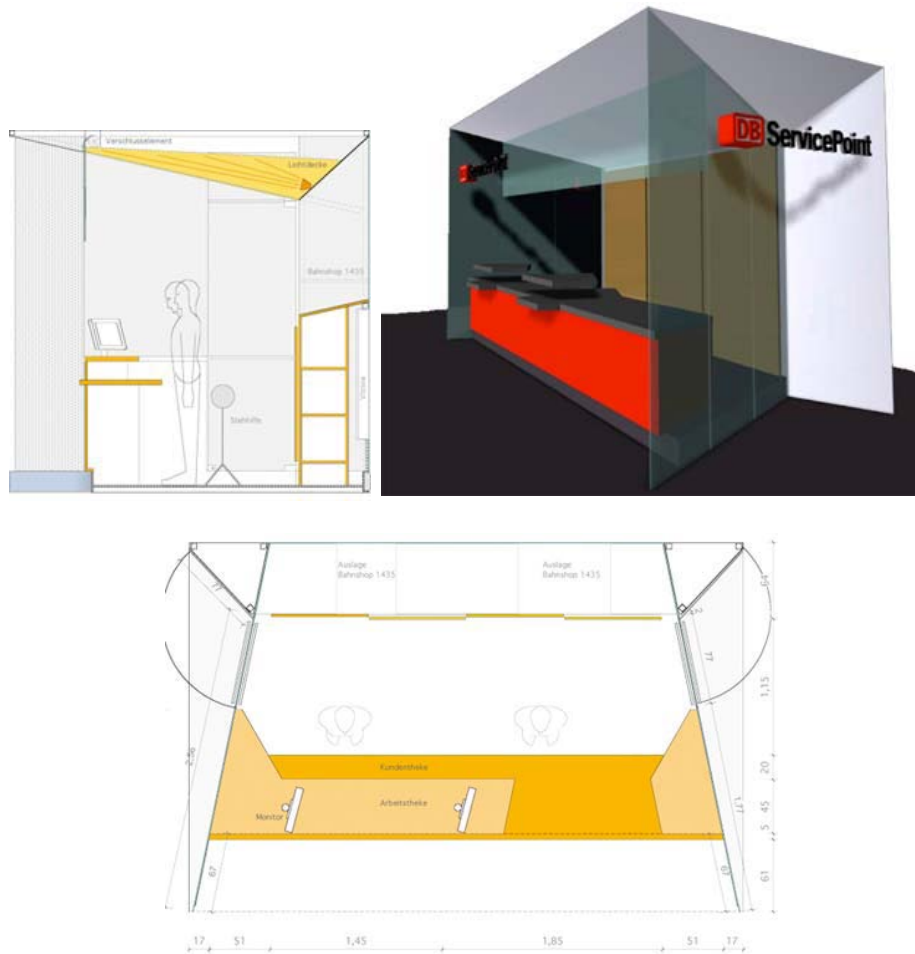


Abbildung 6.21: Grundriß des neuen ServicePoints

Ergebnisse der dynamischen, thermischen Simulationen

Abbildung 6.24 stellt die simulierten Temperaturverläufe eines Referenzjahres differenziert nach Bestand und Entwurf gegenüber. Im Bestandsmodell zeigt die rote Kurve den Temperaturverlauf innerhalb der kleinen Wartehalle, während die blaue Kurve die Außentemperatur und damit die Temperatur auf dem Bahnsteig darstellt. Im Entwurfsmodell repräsentiert die rote Kurve die durchschnittliche Temperatur des gesamten Bahnsteigbereiches, da dieser komplett in eine Wartehalle eingehaust ist. Dabei ist zu erkennen, daß die Temperaturen in der Wartehalle grundsätzlich über den Außentemperaturen liegen und auch höher sind als in der Entwurfsvariante. In einer Wartehalle sind die Temperaturen im Schnitt nur wenig höher als im Außenbereich, wobei die Ausschläge nach oben und unten weniger stark ausgeprägt sind. Extreme Außentemperaturen werden durch die Halle abgepuffert.

Abbildung 6.25 zeigt die Lüftungs- und Fensterverluste sowie die solaren Gewinne beider Varianten im Vergleich. Die Entwurfsvariante hat wesentlich höhere Verluste, die sich im passiven Betrieb

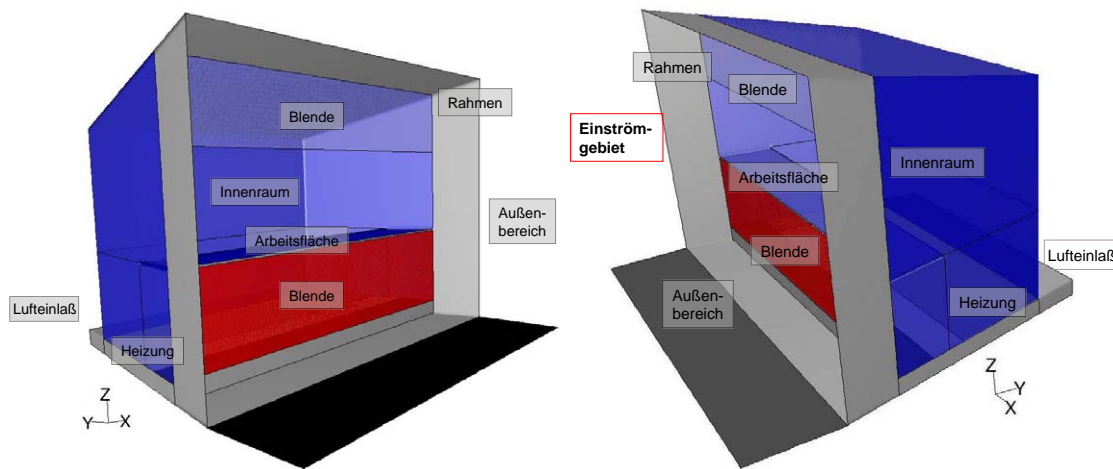


Abbildung 6.22: Gerendertes Netzmodell des ServicePoints

Klimatisierung	Modell	
	Bestand	Entwurf
passiv	Jahrestemperaturverlauf	
aktiv	Wochentemperaturverlauf Januar / Juni	

Abbildung 6.23: Simulationsvarianten mit DK-Solar für den Bahnsteig in Köln-Deutz

jedoch nicht in einem erhöhten Bedarf an Wärmeenergie, sondern in niedrigeren Temperaturen niederschlägt. Der absolute Vergleich der Wärmeverluste zwischen Wartebox und Wartehalle ist allerdings irreführend, da die Wartehalle wesentlich mehr Reisende aufnehmen kann als die Wartebox. Da in der Bestandssituation nicht alle Wartenden in die kleine Wartebox passen, und die meisten von ihnen auf der freien Bahnsteigfläche stehen, müßten deren Wärmeverluste ebenfalls berücksichtigt werden. Stattdessen zeigt Abbildung 6.26 die Jahresbilanz pro Person. Dabei wird davon ausgegangen, daß während der Verkehrszeiten im Schnitt drei Personen gleichzeitig in der Wartebox Platz finden, sich jedoch 30 Personen auf dem gesamten Bahnsteig aufhalten.

In der Bilanzbetrachtung pro Person sind die Lüftungsverluste in der Wartehalle immer noch deutlich höher als in der Bestandssituation, allerdings sind die Fensterverluste und solaren Gewinne nun vergleichbar.

Abbildung 6.27 zeigt die Jahrestemperaturverläufe der Bestands- und Entwurfsvariante bei Betrieb einer aktiven Heizung im Winterfall. Die schwarze Kurve zeigt das Integral des Heizenergiebedarfs. Der deutlich höhere Energieverbrauch der Entwurfsvariante zeigt sich auch in der Wärmegewinn- und -verlustbilanz in Abbildung 6.28. Das Temperaturverhalten beider Varianten in den Sommermonaten ist ähnlich. In den Wintermonaten schafft es die Wartehalle jedoch nicht, Temperaturstürze im Außenbereich vollständig abzuf puffern, sodaß hier Temperaturminima von etwa 5°C niedrigsten Temperaturen von 15°C in der Wartebox gegenüberstehen.

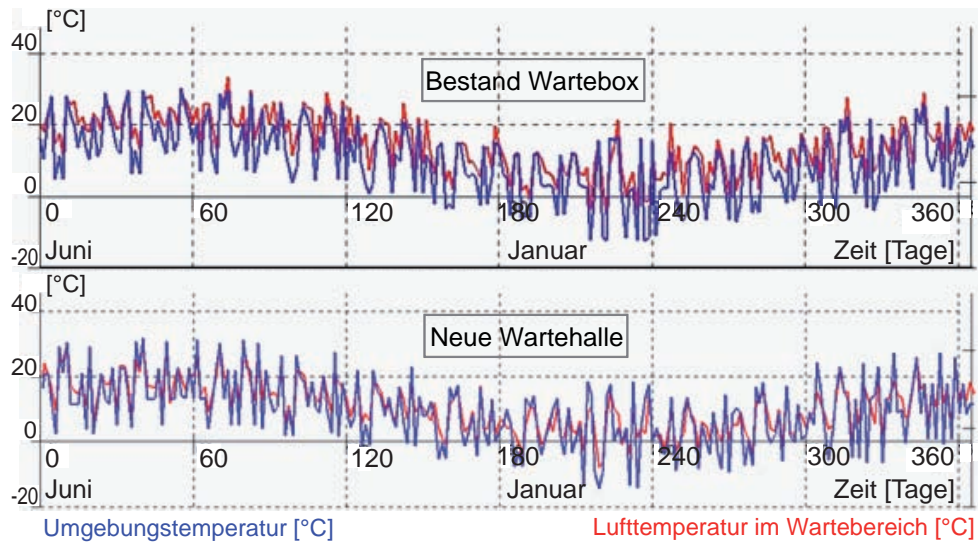


Abbildung 6.24: Jahrestemperaturverlauf eines Bahnsteigs in Köln-Deutz ohne aktive Klimatisierung [123]

Auch bei der Gegenüberstellung in Abbildung 6.28 würde der absolute Vergleich zu einer Verzerrung führen, da die Einhausung eines Bahnsteiges etwa zehnmal so viele Personen gegen das Außenraumklima schützt wie die Wartebbox. Einen besseren Vergleich bietet Abbildung 6.29 mit einer Übersicht der Energiegewinne und -verluste pro Person. Die höheren Lüftungsverluste pro Person resultieren in einem höheren relativen Heizwärmebedarf.

Abbildung 6.30 zeigt den simulierten Temperaturverlauf in einer typischen Januarwoche. Verglichen werden die beiden Varianten Bestand Wartebbox und Entwurf Wartehalle im aktiv temperierten Zustand. Der Temperaturverlauf in der Wartehalle hat ein regelmäßiges Muster: Tagsüber

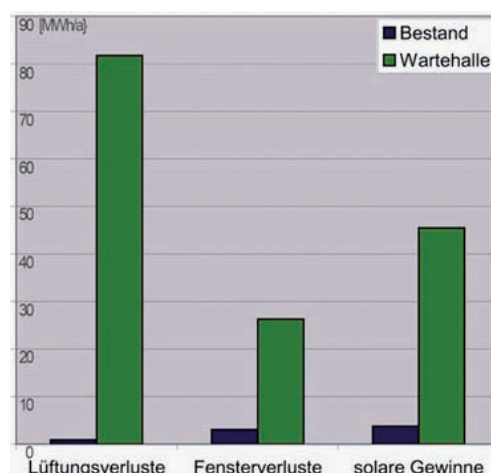


Abbildung 6.25: Jahresbilanz passiv - Wärmegewinne und -verluste [MWh/a] [123]

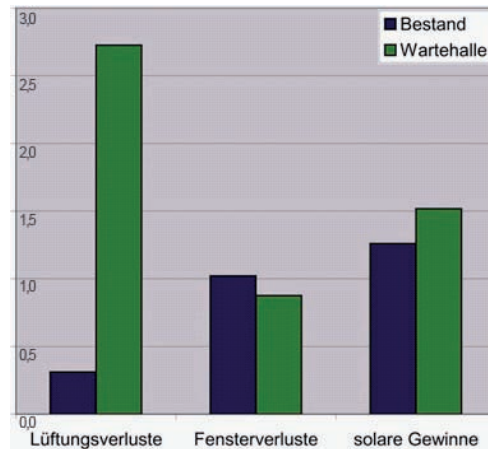


Abbildung 6.26: Jahresbilanz passiv pro Person [123]

liegen die Temperaturen zwischen 12°C und 19°C . Nach Mitternacht, zu Zeiten der Betriebsruhe, sinken die Innenraumtemperaturen kurzfristig unter 10°C . Da die Außentemperaturen zeitweise unter 0°C fallen, und daher entsprechende Winterkleidung bei den wartenden Fahrgästen vorausgesetzt werden kann, erscheint die Temperaturregelung sinnvoll und komfortfördernd im Sinne der Kunden. Der Temperaturverlauf in der Wartebox ist unregelmäßiger. Im Durchschnitt liegen die Temperaturen höher als in der Entwurfsvariante. Der größte Unterschied liegt allerdings im Heizenergiebedarf, der für die gesamte Wartehalle $11,15\text{MWh}/168\text{h}$ beträgt, für die Wartebox nur $0,42\text{MWh}/168\text{h}$, siehe Abbildung 6.32 auf der linken Seite. Selbst unter der Berücksichtigung einer durchschnittlich zehnfach höheren Belegung der Wartehalle ist der spezifische Heizenergiebedarf der Halle deutlich höher als in der kleinen Box.

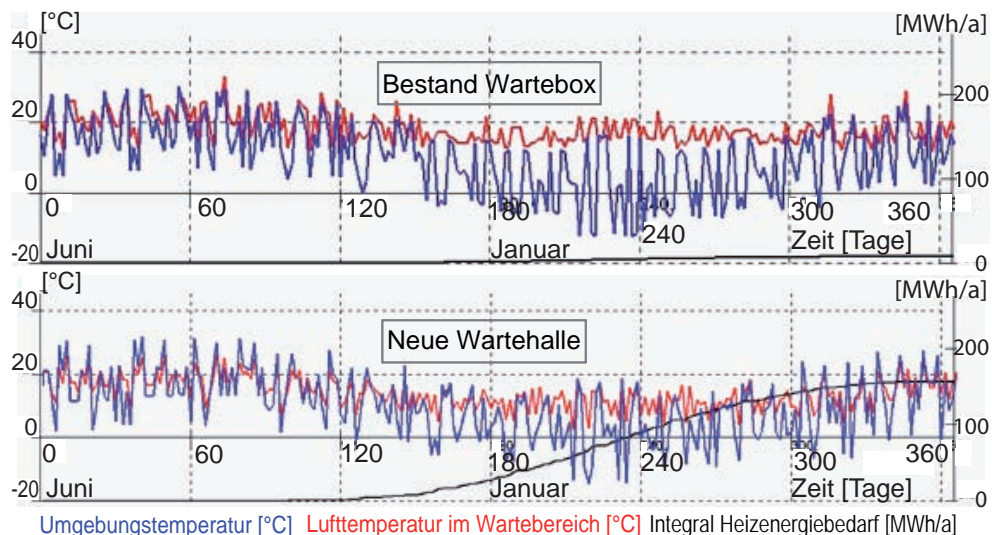


Abbildung 6.27: Jahrestemperaturverlauf mit Heizung [123]

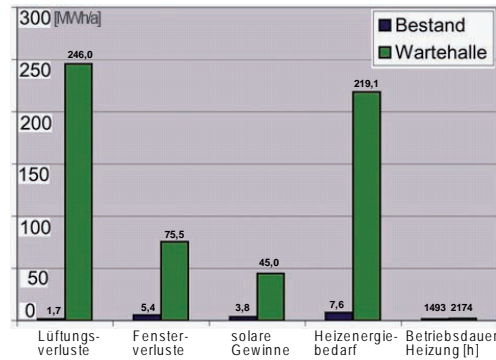


Abbildung 6.28: Jahresbilanz aktiv: Wärmegewinne und -verluste [MWh/a] [123]

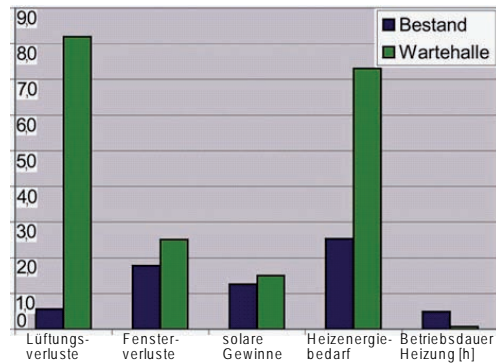


Abbildung 6.29: Jahresbilanz beheizt pro Person [MWh/a] [123]

Anders sieht es im Monat Juni aus. Hier schafft es die Wartehalle besser, die Temperaturschwankungen der Außenluft zu puffern und auszugleichen. Heizenergie wird in der typischen Sommerwoche in beiden Fällen nicht benötigt. Eine Kühlanlage ist nicht vorgesehen, so daß hier die aktive und die passive Variante identisch sind (Abbildung 6.31).

Der Vergleich der beiden Detailsimulationen in Abbildung 6.32 verdeutlicht, daß die Funktionsweise der Entwurfsvariante Wartehalle sehr stark von der Jahreszeit und den klimatischen Bedingungen Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung abhängt. Während die solaren Gewinne im Sommer um einen Faktor von knapp mehr als 2 höher sind als im Winter, sind die Lüftungs- und Fensterverluste im Winter fast viermal so hoch wie im Sommer. Daraus resultiert ein außerordentlich hoher Heizwärmebedarf im Winter. Bei der Wartebox ist der Unterschied zwischen Sommer und Winter etwas schwächer.

Die Wartehalle läßt im passiven Betrieb starke Temperaturschwankungen erwarten. Vor allem in den Wintermonaten könnte es unangenehm kalt für die Wartenden werden. Im aktiv beheizten Betrieb sind der Energieverbrauch und damit die Heizkosten zu hoch. Aus diesem Grund soll mit Hilfe von Dämmmaßnahmen versucht werden, die starken Temperaturschwankungen im passiven Betrieb zu mindern. Die zusätzliche Dämmung wird vor allem im Dachbereich vorgenommen, da das Bestandsdach als reiner Regenschutz ohne wärmedämmende Wirkung ausgeführt wurde.

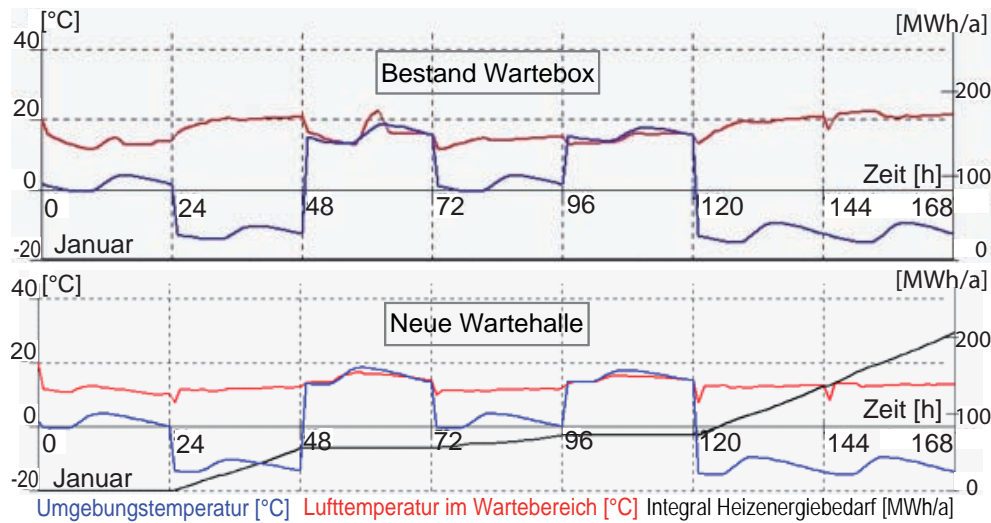


Abbildung 6.30: Wochentemperaturverlauf im Januar mit aktiver Heizung [123]

Der vergleichende Jahrestemperaturverlauf des Bestandsmodells und der gedämmten Wartehalle ist in Abbildung 6.33 dargestellt. Die gedämmte Variante ist in der Lage, die tiefsten Temperaturen unter -5°C abzufangen, allerdings treten nach wie vor Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes auf, was nicht akzeptabel erscheint. Die hohen Verluste an Wärmeenergie sind offensichtlich nicht durch Dämmung zu verhindern, was bedeutet, daß nicht die Wärmetransmission über das Dach, sondern konvektive Wärmeabfuhr durch Luftwechsel mit außen sowie Strahlungsverluste durch die Glasfront dafür verantwortlich sind. Demnach ist auch die Bilanz einer gedämmten und beheizten Bahnsteighalle nur geringfügig besser als die der ungedämmt

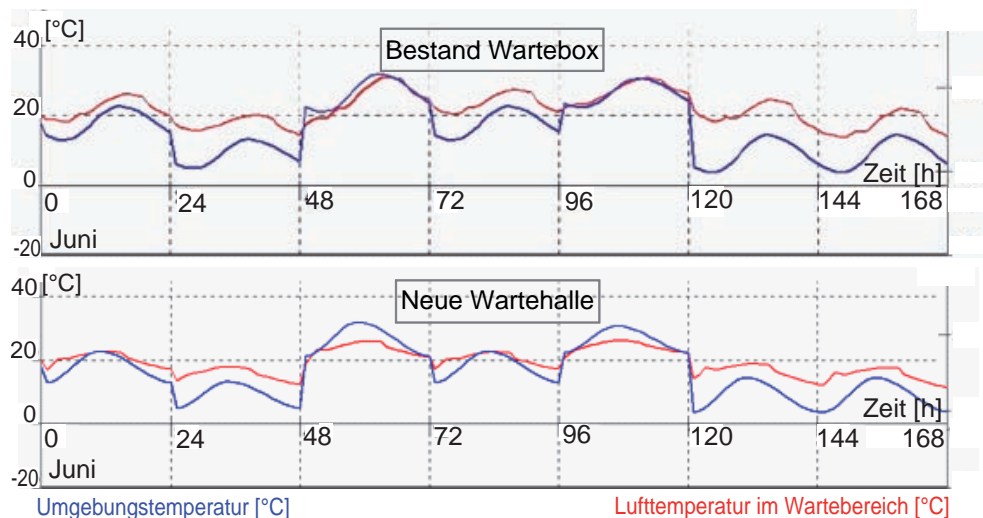


Abbildung 6.31: Wochentemperaturverlauf im Juni [123]

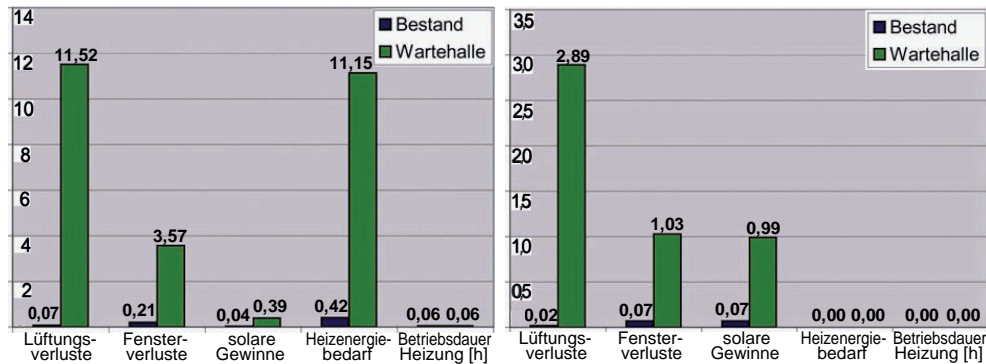


Abbildung 6.32: Wochenbilanzen im Januar (links) und Juni (rechts) [123]

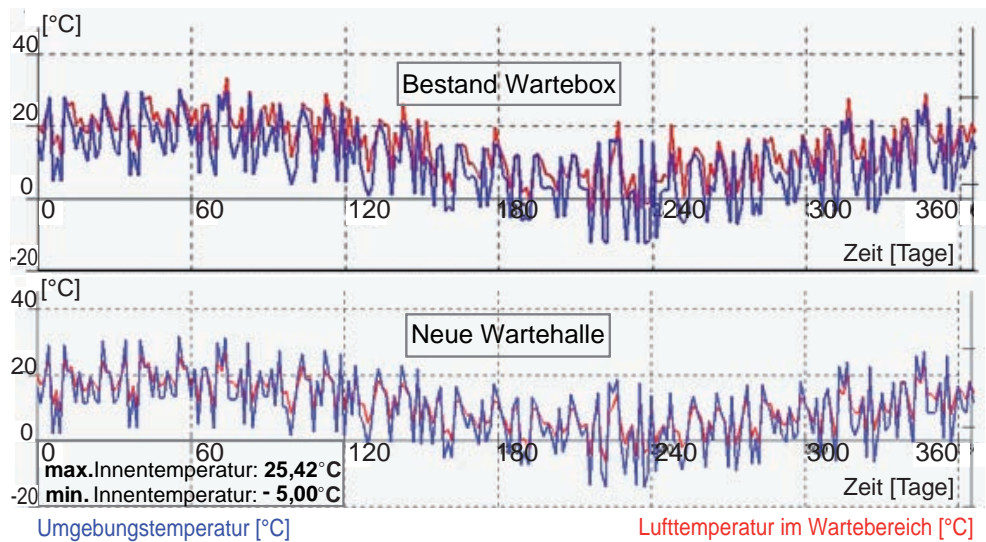


Abbildung 6.33: Jahrestemperaturverlauf im Passivbetrieb mit und ohne Dämmung [123]

beheizten Variante, siehe Abbildung 6.34.

Ergebnisse der Strömungssimulationen

Neben der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur¹ sind vor allem die Luftgeschwindigkeit und -turbulenz verantwortlich für das Komfortempfinden der Reisenden auf Bahnsteigen. Diese beiden Parameter wurden im Rahmen dieser Arbeit mit dem Programm Fluent simuliert. Anders als bei dynamischen, thermischen Gesamtgebäudesimulationen werden bei Strömungssimulationen keine ganzen Wochen oder Jahre simuliert, sondern Momentaufnahmen kurzfristiger thermodynamischer und strömungsmechanischer Zustände berechnet. Daher können als physikalische Randbedingungen auch keine typischen Referenzjahre eingelesen werden. Stattdessen

¹Wärmestrahlung und relative Luftfeuchte werden durch Messungen ermittelt und daher in Kapitel 4.3 behandelt

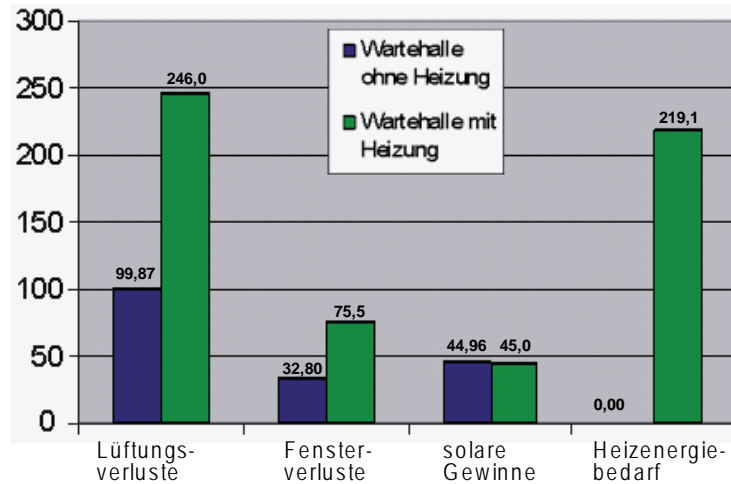


Abbildung 6.34: Jahresbilanz im Passivbetrieb mit und ohne Dämmung [123]

werden beispielhaft die beiden Szenarien leichter Luftzug ($1m/s$) und schwache bis mäßige Brise ($5m/s$) nach der Beaufort-Skala simuliert und analysiert.

Die Abbildungen 6.35 und 6.36 zeigen die Luftströmungen auf dem Bahnsteig bei einer Anströmung aus Richtung Aufgang mit einer Strömungsgeschwindigkeit von $v = 1m/s$. Abbildung 6.35 zeigt die lokalen Luftgeschwindigkeiten auf einer fiktiven horizontalen Schnittebene der Höhe $1m$. In der Grafik wird deutlich, daß sowohl vor dem Aufgang als auch über dem Gleis und der Bahnsteigkante Luftgeschwindigkeiten in der Größenordnung der Einströmungsgeschwindigkeit herrschen. An der Kante der baulichen Umhüllung des Aufgangs treten sogar Luftverwirbelungen mit höherer lokaler Strömungsgeschwindigkeit auf. Jenseits des Aufgangs, unter dem Bahnsteigdach, ist ein deutlicher Windschatteneffekt zu erkennen. Die Strömungsgeschwindigkeit liegt dort unter $0,3m/s$. Dieselbe Situation wird in Abbildung 6.36 im Längsschnitt gezeigt. In dieser Grafik zeigen Strömungspfade die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen an. Die Strömungen mit hoher Geschwindigkeit über und neben dem überdachten Bahnsteigbereich sind annähernd laminar, während die langsamen Strömungen unterhalb des Daches in senkrechten Wirbeln verlaufen. Ursache hierfür könnte der natürliche Auftrieb aus dem Quertunnel und dem Treppenaufgang sein.

Im nachfolgend beschriebenen Simulationsdurchgang wurde eine höhere Luftgeschwindigkeit von $5m/s$ angenommen. Abbildung 6.37 zeigt die Strömungsgeschwindigkeiten im Auf- und Grundriß. Qualitativ unterscheiden sich die Strömungen nicht von denen mit einer Windgeschwindigkeit von $1m/s$. Lediglich die Skalierung des Farbverlaufs hat sich geändert, was darauf schließen läßt, daß nun die Strömungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Raumpunkten proportional um den Faktor 5 gestiegen sind. In der Aufrißdarstellung ist allerdings zu erkennen, daß Aufgang und Bahnsteigdach nicht bündig schließen und somit ein Luftstrahl höherer Geschwindigkeit in den Bereich unterhalb des Bahnsteiges eintritt, der sich aber wie bei dem Luftaustritt aus einer Düse ablöst und zusammen mit der aus dem Aufgang aufsteigenden Luft in einen lokalen Wirbel eintritt. Oberhalb der Wartehalle kommt es wieder zu einer höheren Strömungsgeschwindigkeit.

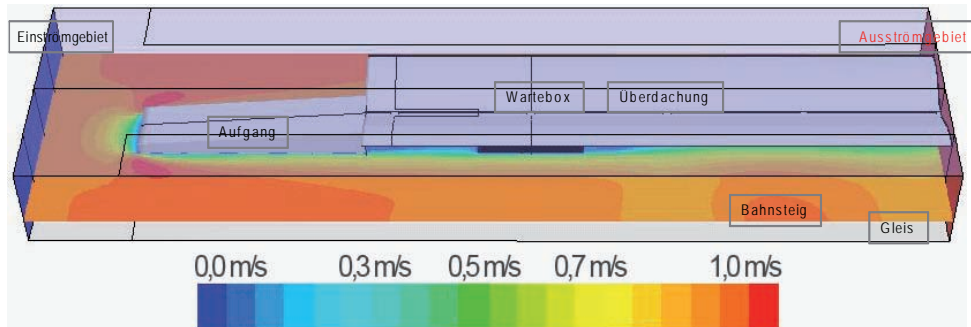


Abbildung 6.35: Luftströmung im Bestand mit 1m/s aus Richtung Aufgang

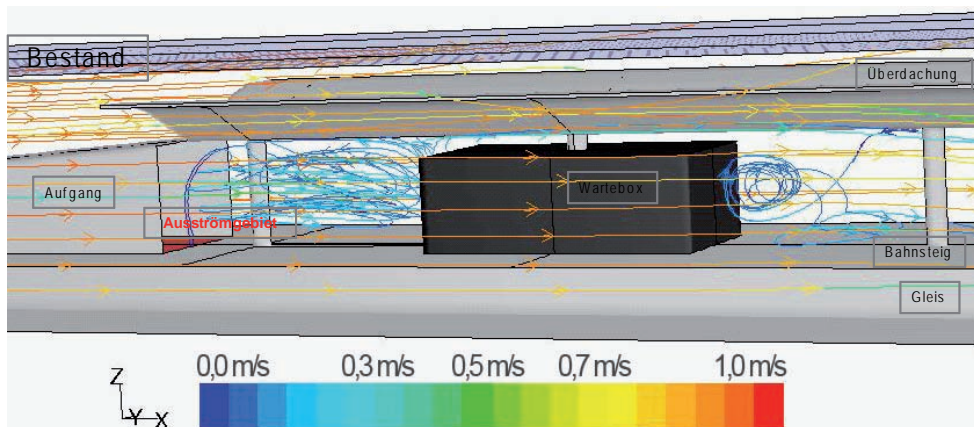


Abbildung 6.36: Darstellung der Strömungsvektoren in der Y-Ebene

Hinter der Box bildet sich ein Windschatten heraus, bis die schnell strömende Luft von oberhalb und neben der Box die Luft im Zentrum des Bahnsteiges mitreißt.

Abbildung 6.38 zeigt das gleiche Modell, allerdings aus umgekehrter Richtung mit einer Luftgeschwindigkeit von 5 m/s beströmt. Wieder bildet das Wartehäuschen einen Windschatten aus, diesmal allerdings auf der Seite des Aufgangs. Durch die Turbulenzen an den Kanten der Wartebox treten in dessen unmittelbarer Umgebung Windgeschwindigkeiten bis zu 5 m/s auf, während die Strömungen außerhalb des Windschattens auf dem Bahnsteig nur Geschwindigkeiten von $3 - 4\text{ m/s}$ aufweisen. Die runden Stützen des Bahnsteigdaches, die sich auf der Symmetrieachse des Bahnsteiges befinden, haben offensichtlich keinen großen Einfluß auf das Strömungsverhalten und bilden keine Windschatten aus.

Beim dritten Simulationsdurchgang mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 5 m/s beträgt der Einströmwinkel 38° zur Gleisachse. Diesmal konnte keine Symmetriespiegelung an der Mittelachse des Bahnsteiges aktiviert werden, da sonst auch die Einströmung spiegelsymmetrisch dupliziert worden wäre. Auffällig bei dieser Variante ist die Tatsache, daß bei einer Einströmung mit 5 m/s lokale Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/s auftreten. Die hohen Geschwindigkeiten sind Teil einer turbulenten Ablösung der bis dato annähernd laminaren Strömung an der Kante

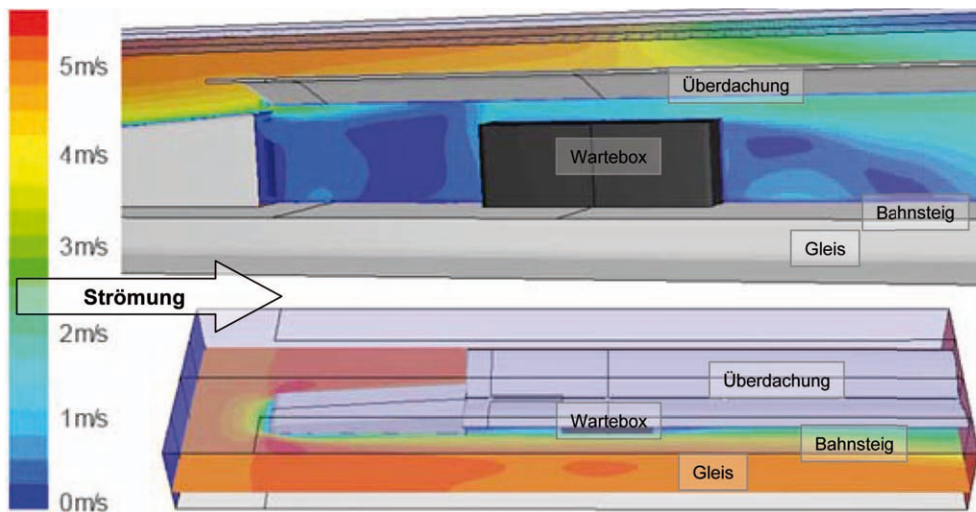


Abbildung 6.37: Einströmung aus Richtung Aufgang mit 5m/s

des Bauteils. Aus diesem Grund ändert sich bei diesem Simulationsdurchgang die Skalierung des Farbverlaufs. Bei der schrägen Anströmung sorgt die Geometrie des Aufgangs und des Daches dafür, daß sowohl im Treppenbereich als auch auf dem Dach kaum Strömungen vorhanden sind. Stattdessen wird die Luft wie durch einen Trichter in den Bereich unterhalb des Bahnsteigdaches gezwungen. Die Strömungsgeschwindigkeit in Beinhöhe ist geringer als die der Einströmung. Oberhalb von einem Meter, also auf Höhe des Rumpfes, des Kopfes und darüber, treten Luftgeschwindigkeiten von über 5 m/s auf. Das Bahnsteigdach entfaltet also eine Trichterwirkung, die die lokalen Luftströmungen unterhalb des Daches beschleunigt und oberhalb bremst.

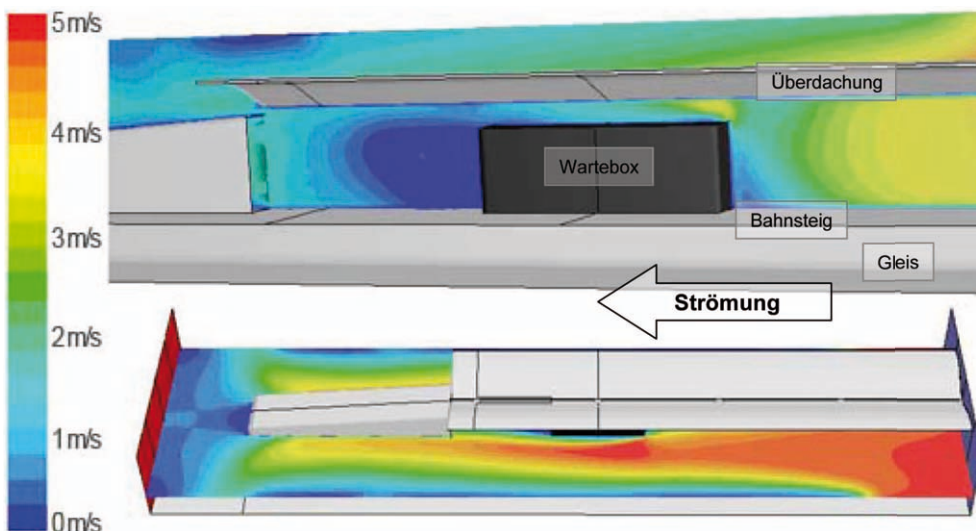


Abbildung 6.38: Einströmung in Gegenrichtung mit 5m/s

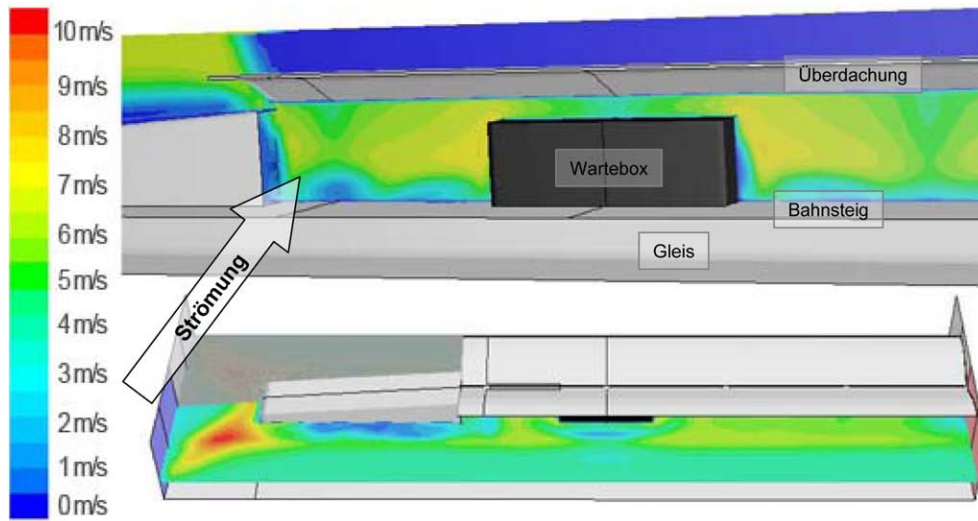


Abbildung 6.39: Einstromung schräg aus Richtung Gleis mit 5m/s

Die Abbildungen 6.40 und 6.41 zeigen das Strömungsverhalten der Luft auf dem Bahnsteig während und nach der Durchfahrt eines Triebfahrzeuges. Das Triebfahrzeug fährt mit einer Geschwindigkeit von 15m/s am Bahnsteig vorbei, bremst und kommt an dessen Ende zum Stehen. In Abbildung 6.40 sind die Strömungspfade, gefärbt nach der Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Der fiktive Betrachter befindet sich auf dem Nachbarbahnsteig und fokussiert die Wartebbox und den Aufgang. Zum Zeitpunkt $t = 0$ befindet sich das Triebfahrzeug noch in der Anfahrt auf den Bahnsteig. Es sind noch keine strömungsmechanischen Auswirkungen auf das betrachtete Strömungsgebiet erkennbar. Die einzigen Strömungen resultieren aus dem Auftrieb aus dem Aufgang. Zum Zeitpunkt $t = 7,5s$ hat das Triebfahrzeug die Stelle des Betrachters gerade passiert. Es

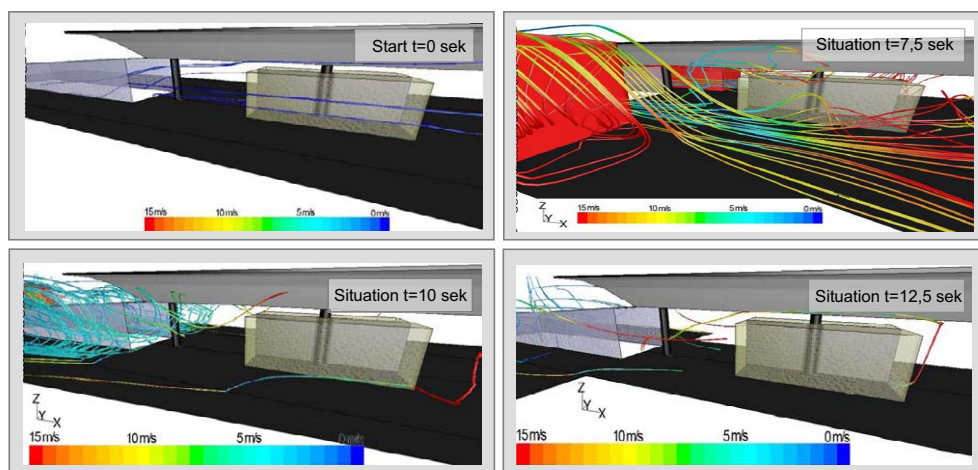


Abbildung 6.40: Strömungspfade bei Simulation eines durchfahrenden Triebfahrzeuges

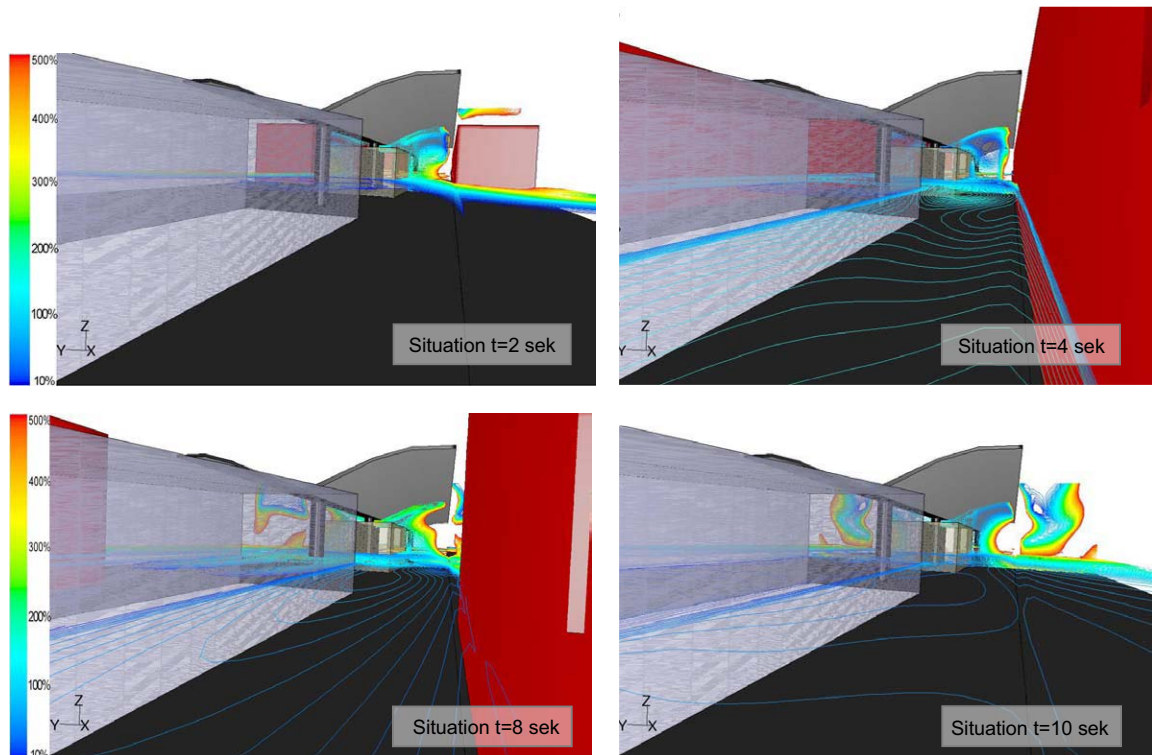


Abbildung 6.41: Turbulenzgrade im Nachlauf eines durchfahrenden Triebfahrzeugs

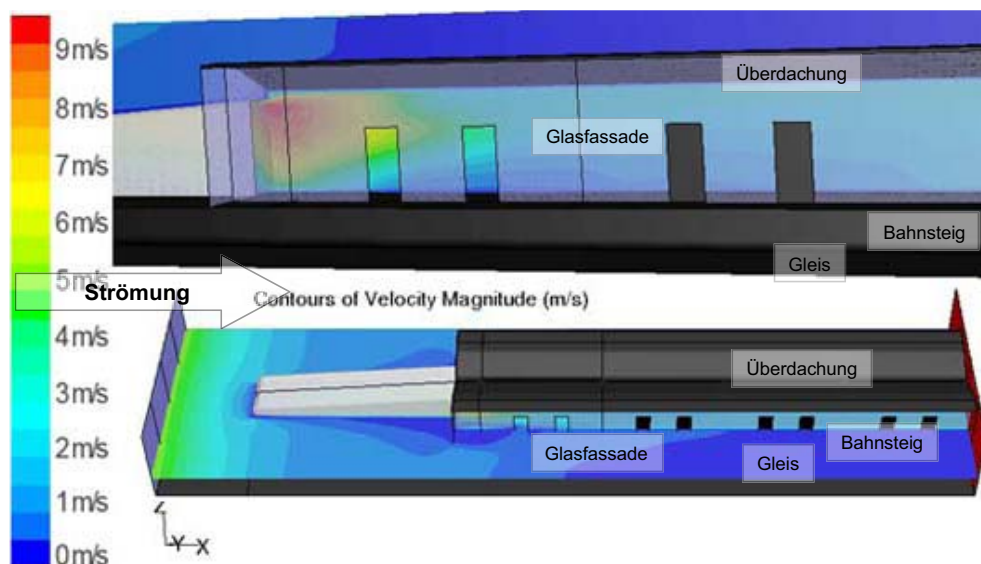


Abbildung 6.42: Strömungsverhalten der Entwurfsvariante bei Wind mit $v=1\text{m/s}$

ist eine hochturbulente und verwirbelte Strömung im direkten Anschluß an das Triebfahrzeug erkennbar, die in eine laminare Nachlaufströmung übergeht. Die Geschwindigkeit des Nachlaufs nimmt zunächst mit größerem Abstand zu. Zum Zeitpunkt $t = 10\text{s}$ hat das Triebfahrzeug den betrachteten Bereich verlassen. Die Nachlaufströmung hat sich inzwischen abgelöst und wirbelt mit relativ geringer Geschwindigkeit. Die Strömungsintensität nimmt nach 10 Sekunden schlagartig ab, allerdings gibt es noch vereinzelte Turbulenzen mit hoher Geschwindigkeit im Bereich der Wartebox. Dieser Sachverhalt wird vor allem in Abbildung 6.41 deutlich, in der der Turbulenzgrad der Strömungen als Farbe der Strömungspfade dargestellt wird. Die Perspektive entspricht der der Sicht eines Betrachters, der am selben Bahnsteig neben dem Ausgang steht. Das Triebfahrzeug schiebt eine relativ kleine, aber turbulente Bugwelle vor sich her. Der abgelöste Nachlauf bricht an den Aufbauten auf dem Bahnsteig, vor allem an der Wartebox. Die Turbulenzen sind in den Bereichen am höchsten, die das Triebfahrzeug längst passiert hat. Diese Simulationsergebnisse decken sich mit den Messungen, die in Abschnitt 4.3 beschrieben werden.

Die Abbildungen 6.42 und 6.43 zeigen die Entwurfsvariante, bei der Bahnsteig und Bahnsteigdach durch Glasfassaden zu einer geschlossenen Bahnsteighalle ausgebaut wurden. Die Luft strömt wie in den Abbildungen 6.35, 6.36 und 6.37 aus Richtung Ausgang. Zunächst beträgt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Strömungsfeld etwa 1m/s . Durch einen Windstoß wird die Luft auf 5m/s beschleunigt. Die beiden ersten Türen der Fassade links im Anschluß an den Ausgang sind geöffnet, die restlichen Türen geschlossen. Abbildung 6.42 zeigt, daß bei geringen Luftgeschwindigkeiten außerhalb der Halle und nur zwei geöffneten Türen das Strömungsverhalten in der Halle ausschließlich durch den Auftrieb aus dem Ausgang bestimmt wird. Nachdem die Druckwelle des Windstoßes den Bahnsteig passiert hat, löst die durch die beiden Öffnungen eintretende Druckluft den Auftriebswirbel auf und drückt mit relativ geringer Geschwindigkeit in den Ausgang. Die Luftgeschwindigkeit in der Halle bleibt gering. Im Bereich der Bahnsteigkante, die sich außerhalb der Glasfassade befindet, verhindert der durch die Querscheibe hervorgerufene Windschatten Luftgeschwindigkeiten über 2m/s . Lediglich über den Gleisen kann die einströmende Luft ihre volle Geschwindigkeit von 5m/s entfalten. Das Phänomen des Windschattens und des inneren Auftriebs wird in der Darstellung der Strömungspfade in Abbildung 6.44 besonders deutlich.

Die Darstellung von Strömungsgebieten mit gleicher Turbulenz in Abbildung 6.45 verdeutlicht den turbulenten Charakter der langsamen Auftriebsströmungen im Innern der Halle, während die schnelleren Strömungen außerhalb der Halle annähernd laminar sind.

In Abbildung 6.46 werden die Luftströme inner- und außerhalb der Halle bei Windstößen aus verschiedenen Richtungen dargestellt. Sowohl bei schräger Anströmung als auch bei Windstößen parallel zu den Gleisen, allerdings aus der dem Ausgang entgegengesetzten Richtung, kann die schnelle Strömung trotz einiger Fassadenöffnungen nicht entscheidend in das Innere der Halle eindringen. Allerdings entfällt bei Windstößen, die nicht aus Richtung Ausgang kommen, der Windschatteneffekt der Querscheibe, sodaß über der Bahnsteigkante Luftströmungen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 5m/s herrschen.

Abbildung 6.47 zeigt das Strömungsverhalten der Luft im Inneren der Bahnsteighalle während der Durchfahrt eines Triebfahrzeuges. Im oberen Teil der Abbildung werden die Luftgeschwindigkeiten in einer Ebene 1m über dem Boden farbig dargestellt. Im unteren Teil werden farbig die Turbulenzgrade der Strömung auf Oberflächen gleicher Geschwindigkeit dargestellt. Die Simulation zeigt, daß die hohen Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzen, die sich über dem

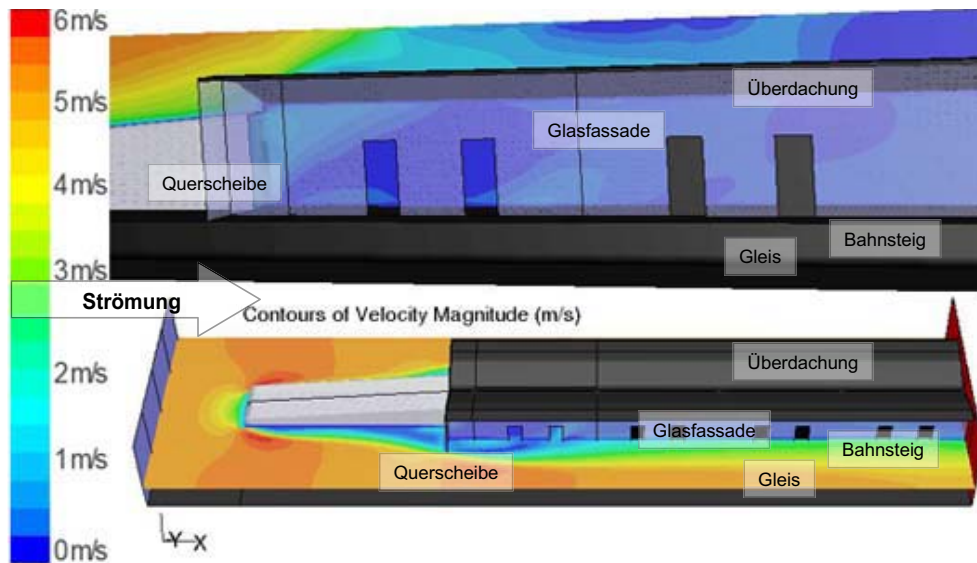


Abbildung 6.43: Strömung aus Richtung Aufgang mit $v=5\text{m/s}$

Gleis und der Bahnsteigkante ergeben, nicht in die Tiefe des eingehausten Bahnsteiges eindringen können. Der Fahrtwind des Triebfahrzeuges bricht an den Rändern der Fassadenöffnungen und verwirbelt dort mit hohem Turbulenzgrad.

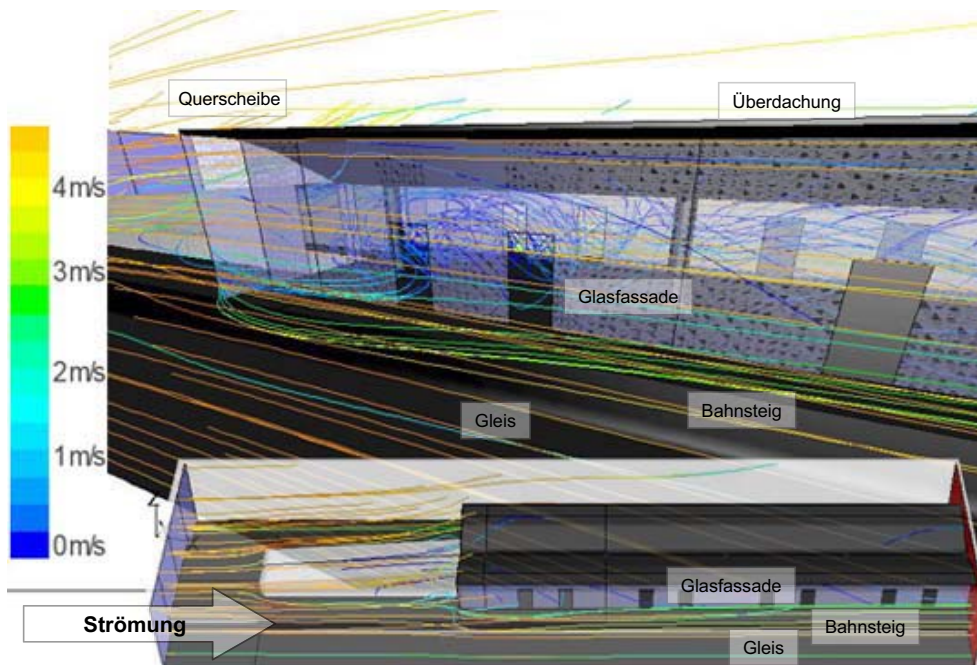


Abbildung 6.44: Darstellung der Strömungspfade bei $v=5\text{m/s}$

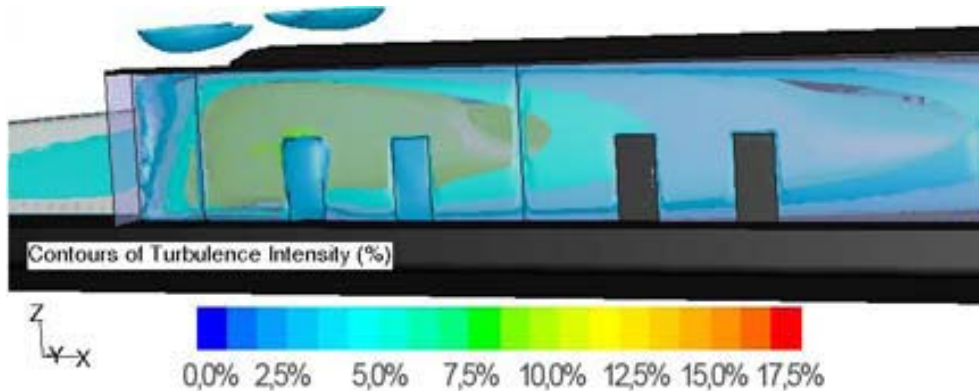


Abbildung 6.45: Darstellung von Strömungsgebieten mit gleicher Turbulenz

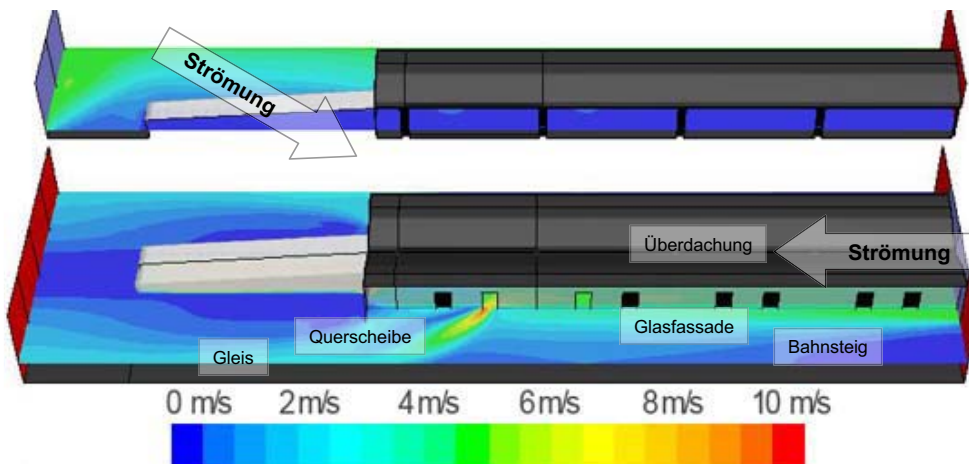


Abbildung 6.46: Darstellung der Luftströme bei Windstößen aus verschiedenen Richtungen

Bewertung und Analyse der Simulationsergebnisse

Die Ausbildung einer Bahnsteighalle in Form von Glasfassaden zwischen Boden und Bahnsteigdach bietet einen großflächigen Schutz gegen extreme Außentemperaturen und unangenehme Luftzugerscheinungen aufgrund von Wind und Zugdurchfahrten. Die Temperaturschwankungen in der passiven Variante sind zwar stärker als in der bestehenden Wartehalle, allerdings kommt sie allen Wartenden auf dem Bahnsteig zugute und nicht nur einer kleinen Gruppe. Die aktiv temperierte Variante kann zwar die gleichen Lufttemperaturen bieten wie die kleine Wartehalle im Bestand, allerdings ist der Energieverbrauch zu hoch. Da die Reisenden sowohl im Empfangsgebäude als auch im Zug ganzjährig gemäßigte Innenraumtemperaturen vorfinden, darf der Aufenthalt zwischendurch auf dem Bahnsteig nicht extrem davon abweichen, da sonst das thermische Komfortempfinden gestört würde. Die niedrigste Innenraumtemperatur in der Entwurfsvariante liegt im Laufe eines typischen Referenzjahres bei -5°C zu einem Zeitpunkt, an dem die Außentemperatur bei -10°C liegt. Die Höchsttemperatur im gesamten Jahr liegt bei $+25,4^{\circ}\text{C}$ trotz Außentempe-

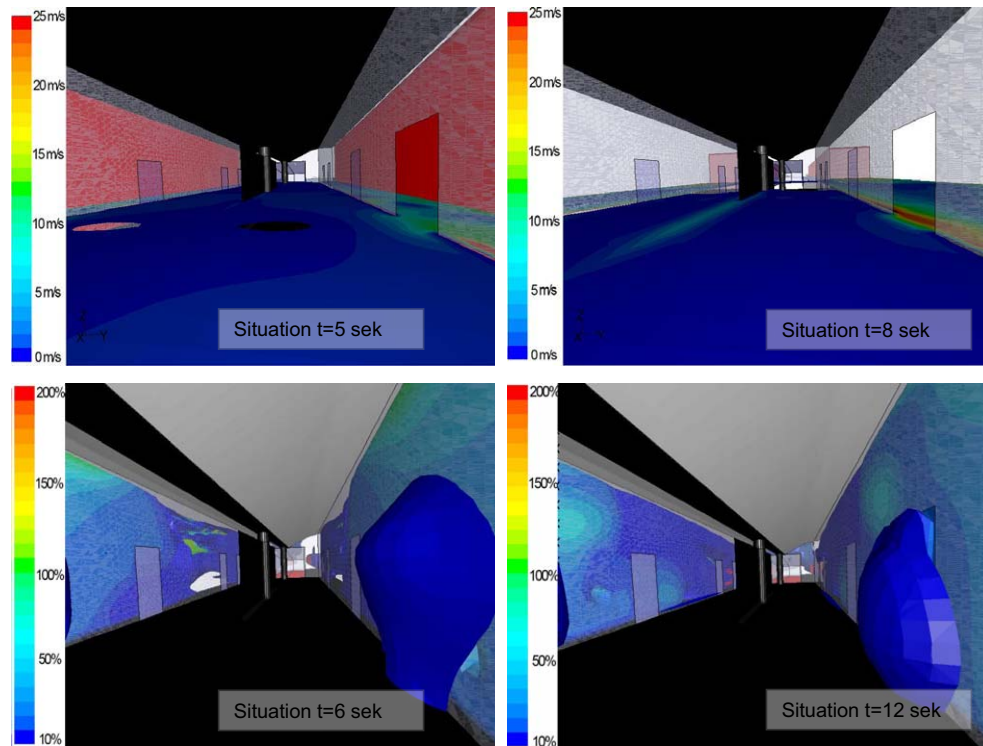


Abbildung 6.47: Geschwindigkeit und Turbulenz im Innenraum bei einer Zugdurchfahrt

raturen über 30°C . Das liegt im Winterhalbjahr neben den geringeren Konvektionsverlusten nach außen und Nutzung der menschlichen Abwärme vor allem am Auftrieb aus dem stets gemäßigt temperierten unterirdischen Quergang. In der Bestandsvariante hängt der Windschutz stark von der Windrichtung und von den Einbauten auf dem Bahnsteig ab. In der Entwurfsvariante ist grundsätzlich ein guter Windschutz gegeben. Lediglich in unmittelbarer Umgebung der Fassadenöffnungen kommt es zu hohen Turbulenzen.

Eine Übersicht der Vor- und Nachteile der Entwurfsvariante ist in Tabelle 6.1 zusammengestellt.

Positiv	Negativ
Sichtbezug zu den Zügen	Lüftungsverluste
Aufenthaltsqualität	Heizenergiebedarf oder Temperaturschwankungen
Thermische Schließung des Bahnhofs	Wartungsaufwand
Schutz gegen turbulente Luftströme	Investition in Planung und Bau
Hohe Personenfassung	Sicherheitsrisiko im Türbereich
Solare Gewinne	Einheitliche Türabstände bei Zügen
Großer geschützter Wartebereich	Geringere nutzbare Bahnsteigfläche
Nutzung des thermischen Auftriebs	

Tabelle 6.1: Fazit der beheizten Wartehalle

6.2.2 Empfangshalle Darmstadt Hbf

Im Gegensatz zu den Bahnsteigbereichen, auf denen sich vorwiegend Kunden mit kurzer Verweildauer aufhalten, befinden sich in Empfangshallen auch Arbeitsplätze für Personal und Gewerbetreibende. Im Falle des Darmstädter Hauptbahnhofs gibt es zwar keine Sitzplätze für Langzeitwartende in der Empfangshalle, wohl aber durch Dritte betriebene Cafés und Bistrobereiche für den Aufenthalt von Bahnkunden. Da die Verweildauer der Menschen im Empfangsgebäude deutlich höher ist als auf Bahnsteigen, die Kunden häufig zwischen den verschiedenen Zonen des Empfangsgebäudes wechseln und dabei jeweils die Empfangshalle durchschreiten, stellt sich die Frage, ob das Empfangsgebäude klimatisch betrachtet als ein kompakter Innenraum ausgebildet und betrieben werden sollte, oder ob die Empfangshalle als unregelmäßiger passiver Puffer zwischen klimatisch autarken, jedoch zur Empfangshalle hin offenen Informations- und Gewerbezone fungieren sollte. Diese beiden grundsätzlichen Varianten sind in Abbildung 2.9 in Abschnitt 2.1.3 dargestellt. Die Bewertung dieser beiden Varianten hinsichtlich Raumklima und Energieverbrauch ist Ziel der im folgenden Abschnitt beschriebenen thermischen Simulationen. Außerdem soll die Frage beantwortet werden, mit welchen Maßnahmen der Wärmeenergieverbrauch der Variante mit beheizter Empfangshalle reduziert werden könnte. Eine besondere Rolle innerhalb der Empfangshalle spielt der ServicePoint. Um seiner Rolle als offen zugängliches, zentrales und gut sichtbares Informationszentrum gerecht zu werden, befindet er sich im Falle des Darmstädter Hauptbahnhofs inmitten der Empfangshalle und ist ab Brüstungshöhe auf einer Längsseite vollständig geöffnet. Das Luftvolumen des ServicePoints ist wesentlich geringer als das der umgebenden Empfangshalle, sodaß seine Innenraumtemperatur von der der Empfangshalle dominiert wird. In der Bestandsvariante, in der die Empfangshalle klimatisch betrachtet ein unregelmäßiger passiver Puffer ist, kommt es im Winter zu Problemen, da das Personal im ServicePoint unter Kälte und Zuglufterscheinungen leidet, was einen hohen Krankenstand verursacht. Eine Schließung des ServicePoints kommt wie in Abschnitt 5.2 beschrieben aus funktionellen Gründen nicht in Frage. Die derzeit in der Praxis betriebene Lösung sieht so aus, daß die lokale Raumtemperatur mittels Heizstrahler (herkömmlicher Typ ServicePoint) bzw. eingeblasener heißer Luft (neuer Typ ServicePoint) angehoben wird. Dieses Verfahren birgt folgende Nachteile:

- Luftzugerscheinungen bleiben
- Hohe Energieverluste an die Empfangshalle durch Konvektion
- Strahlungsasymmetrien beim herkömmlichen Typ
- Vertikale Temperaturgradienten beim neuen Typ
- Thermischer Auftrieb innerhalb des ServicePoints

Die Abgabe warmer Luft an die unregelmäßige Empfangshalle in Abhängigkeit der Türöffnungen der Halle werden durch Strömungssimulationen der gesamten Halle untersucht. In weiteren Detailsimulationen werden die Strömungen im und vor dem ServicePoint² untersucht.

Ergebnisse der dynamischen, thermischen Simulation

Zunächst wird die Situation im Bestand simuliert, das heißt die Empfangshalle als passiver Puffer zwischen den Außenbereichen und den temperierten Zonen ServicePoint, Reisezentrum und

²Mitarbeiter- und Kundenbereich, Warteschlange

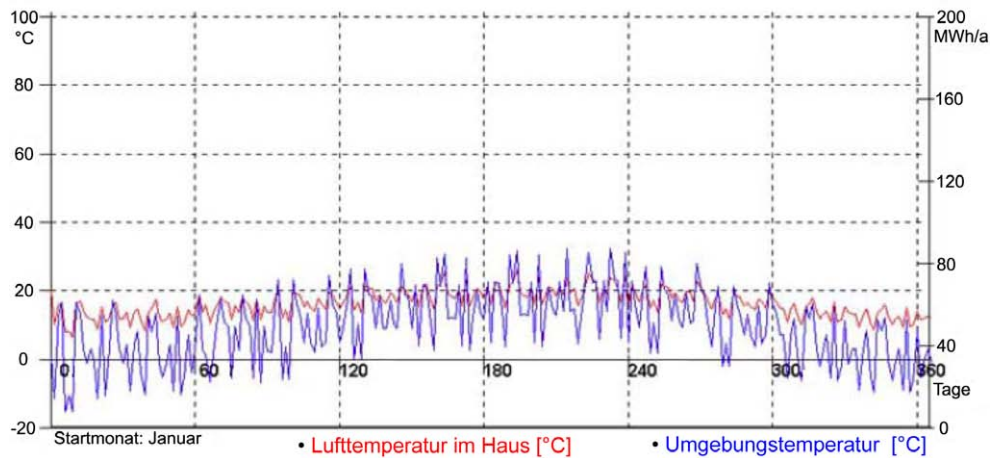


Abbildung 6.48: Jahrestemperaturverlauf ohne aktive Heizung[124]

diversen Geschäften und Gastronomiebetrieben. Wie in Abbildung 6.48 zu sehen puffert die passive Halle erstaunlich gut gegen extreme Außentemperaturen. Die Innentemperaturen schwanken zwischen $5,8^{\circ}\text{C}$ und $26,3^{\circ}\text{C}$, während die Außentemperaturen zwischen -10°C und $+32^{\circ}\text{C}$ liegen. Allerdings sind die Temperaturen unter 10°C zu niedrig für die in der Empfangshalle im Sitzen arbeitenden Menschen. Die Höchsttemperaturen im Sommer stellen keine Komforteinbuße dar.

Daher soll in der alternativen Variante untersucht werden, wieviel Heizenergie nötig wäre, um auch im Winter während der Betriebszeit durchgehend Lufttemperaturen vorzuhalten, die Arbeitnehmern und wartenden Kunden zugemutet werden können. Aus diesem Grund wird für die bestehende Bausubstanz eine Heizung mit 50kW Maximalleistung angenommen, die so geregelt ist, daß bei Innenraumtemperaturen unter 18°C mit geheizt und oberhalb von 20°C nicht geheizt

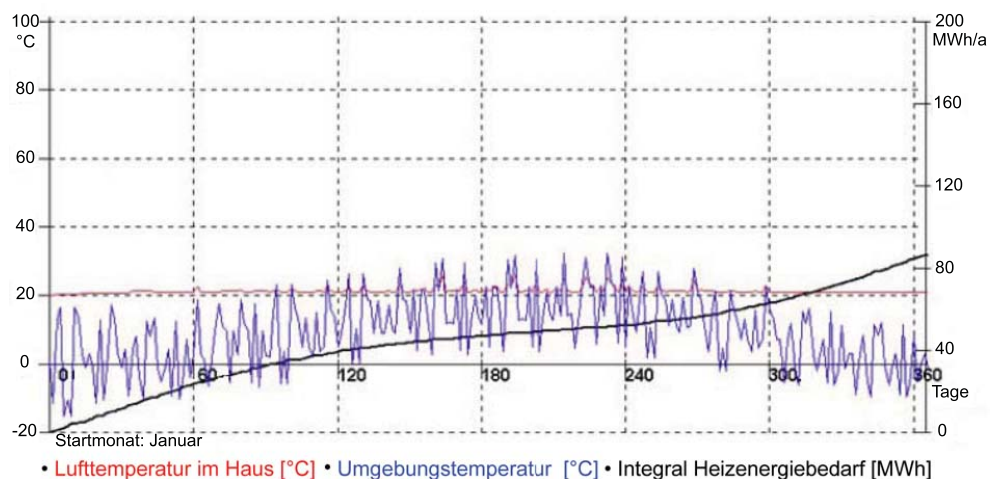


Abbildung 6.49: Jahrestemperaturverlauf mit aktiver Heizung[124]

wird. Daraus ergibt sich im Jahresverlauf eine absolute Minimaltemperatur von 17,28°C, während die Maximaltemperatur der Höchsttemperatur in der passiven Variante entspricht.

Durch den Betrieb der Heizung ergibt sich jedoch im Verlauf des Jahres ein Heizwärmebedarf von insgesamt 92,1 MWh. Die Heizung ist insgesamt 2.598 Stunden pro Jahr in Betrieb. Die genaue Bilanz der Empfangshalle ist in Abbildung 6.50 dargestellt.

		Passiv (ohne Heizung)	Aktiv (mit Heizung)
Lüftungsverluste	[kWh/a]	45.788	70.744
Wandverluste	[kWh/a]	20.894	44.985
Erdreichverluste	[kWh/a]	7.655	15.087
Fensterverluste	[kWh/a]	-24.967	8.830
Solare Gewinne	[kWh/a]	28.597	28.017
Interne Gewinne	[kWh/a]	20.516	19.330
Heizenergiebedarf	[kWh/a]	0	92.096
Maximale Heizleistung	[kW]	0	50
Betriebsstunden Heizung	[h/a]	0	2.598
Minimaltemperatur	[°C]	5,84	17,28
Maximaltemperatur	[°C]	26,16	26,28

Abbildung 6.50: Energie- und Temperaturbilanz der Empfangshalle

Auffällig ist, daß in der passiven Variante die Fensterverluste negativ sind, in Wahrheit also Fens-
tergewinne sind. Dagegen stellt Transmission durch die Fenster in der aktiven Variante tatsächlich
einen Wärmeverlust dar. Nun stellt sich die Frage, ob durch den Energieverbrauch in der Emp-
fangshalle die übrigen, bisher aktiv klimatisierten Gewerbe- und Informationsflächen energetisch
entlastet werden. Tabelle 6.2 stellt die energetische Bilanz des gesamten Bahnhofs dar.

Zone	Verbrauch Bestand	Verbrauch Empfangshalle beheizt
Empfangshalle	0 MWh	92,1 MWh
Zeitschriften	92,68 MWh	79,0 MWh
Reisezentrum	220,7 MWh	207,9 MWh
Blumenladen	76,7 MWh	76,6 MWh
Gastronomie	195,2 MWh	184,9 MWh
Dach	0 MWh	0MWh
Summe	585,2 MWh	640,5 MWh

Tabelle 6.2: Energiebilanz des gesamten Empfangsgebäudes

Der Heizenergiebedarf der Empfangshalle ist offensichtlich um etwa 55MWh/a größer als die
Summe der Einsparungen in den Gewerbezonnen. Allerdings war der ServicePoint noch nicht
Teil der Simulation, da aufgrund seiner geringen Größe und der damit verbundenen geringen

thermischen Trägheit gegenüber der Halle bei gleichzeitig sehr hohem Öffnungsgrad zur Halle numerische Instabilitäten bei der Berechnung der Energieströme eines Jahres auftraten. Neben den rein energetischen Aspekten bleibt die Frage unbeantwortet, bei welchem Temperaturniveau in der Empfangshalle das Gesamtkomforterlebnis der Reisenden bei ihrer Bewegung von draußen durch die Empfangshalle, die Gewerbebereiche, über den Bahnsteig und in den Zug am besten ist. Da extreme Temperaturschwankungen ebenso unangenehm wirken wie extreme Temperaturen sollte die Hallentemperatur ein vermittelndes Niveau zwischen außen und innen haben.

In einem weiteren Simulationsvorgang wird geprüft, ob durch geeignete Dämmmaßnahmen der Halle der Energieverlust derart reduziert werden kann, sodaß der Betrieb einer beheizten Halle im Winter doch wirtschaftlich sein kann gegenüber der passiven Variante.

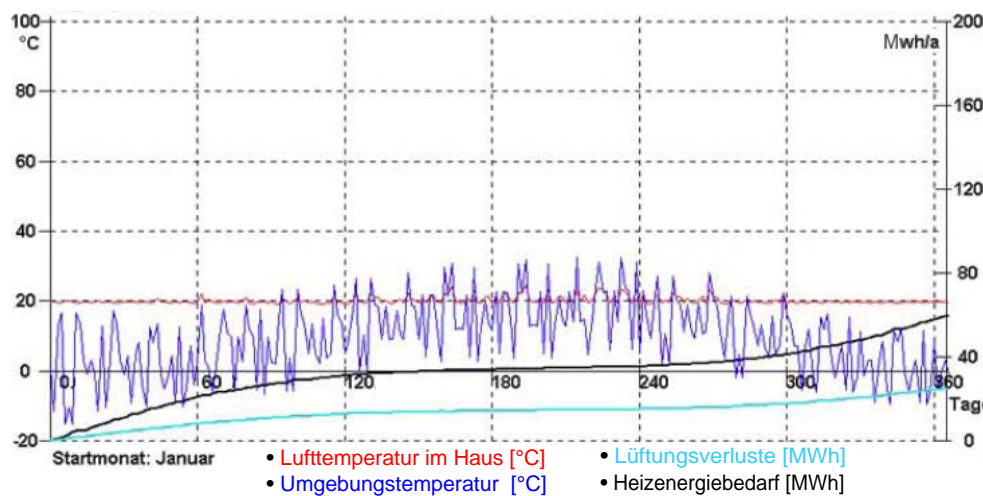


Abbildung 6.51: Jahrestemperaturverlauf nach Sanierung

Abbildung 6.51 zeigt einen ähnlichen Temperaturverlauf in der Halle wie Abbildung 6.49, jedoch ist der Jahresenergieverbrauch deutlich geringer. Mit etwa 60MWh/a Wärmeenergiebedarf für die Empfangshalle statt 92MWh/a in der beheizten, ungedämmten Variante ist aber dennoch die passive Bestandsvariante am wirtschaftlichsten. Der Grund hierfür liegt in den hohen Konvektionswärmeverlusten über die Türen nach außen und zum Querbahnsteig, sowie die große Höhe der Halle im Vergleich zu der Höhe der Gewerbebereiche und der Menschen in der Halle. Möglicherweise könnte mehr Energie eingespart werden, wenn die warme Luft, die sich unter der Innendachkuppel sammelt, mit Hilfe technischer Ventilation wieder nach unten befördert würde. Um dies besser beurteilen zu können, soll das Strömungsverhalten der warmen Luft in der Empfangshalle mit Hilfe von Strömungssimulationen untersucht und im folgenden Abschnitt beschrieben werden. Ein weiteres Ziel der Strömungssimulationen besteht darin, Aussagen über die Gefahr von Zugluft und turbulenten Luftverwirbelungen treffen zu können. Luftgeschwindigkeiten sind neben Luft- und Strahlungstemperaturen die wichtigsten nicht individuell regelbaren Parameter³ für den Komfort für Menschen.

³Körperliche Aktivität und Kleidung sind weitere wichtige Parameter, die die betroffenen Personen jedoch individuell regeln können

Ergebnisse der Strömungssimulation

Die verschiedenen Varianten der Strömungssimulationen sind in Abbildung 6.52 zusammengefaßt. Untersucht wird dabei schwerpunktmäßig die Verteilung der warmen Luft, die aus dem ServicePoint austritt. Der ServicePoint ist zentral in der Empfangshalle positioniert, sodaß er von allen drei Zugängen zur Halle gut gesehen und erreicht werden kann. Die drei Zugänge sind die Doppeltüren zu den Vorplätzen im Osten (ÖPNV) und Süden (Taxi) sowie der Durchgang zum Querbahnsteig, dessen thermische Grenze eine Glasfassade mit drei Schiebetüren bildet. In der Basisvariante ist nur der Durchgang zum Querbahnsteig geöffnet, die Türen zum Außenbereich im Süden und Osten sind geschlossen. In zwei weiteren Varianten werden jeweils die Türen im Süden und Osten geöffnet, sodaß sich eine Zugluftströmung in der Halle einstellt und die normale Wärmeausbreitung in der Umgebung des ServicePoints stört.

1. Simulation: Wärmeabgabe ServicePoint	
• Innentemperatur	= 10°C
• Temperatur der Wände	= 10°C
• Temperatur der Türen	= 5°C
• Temperatur Abluft SP	= 20°C
• Alle Türen geschlossen	
• Ausgang zu Gleisen geöffnet	
2. Simulation: Öffnung einer Südtür	
• Schrittweises Öffnen von zwei Südtüren	
• Temperatur Zuluft	= 0°C
• Geschwindigkeit Zuluft	= 5m/s
3. Simulation: Öffnung einer Osttür	
• Schrittweises Öffnen von zwei Osttüren	
• Temperatur Zuluft	= 0°C
• Geschwindigkeit Zuluft	= 5m/s

Abbildung 6.52: Varianten der Strömungssimulationen der Empfangshalle Darmstadt Hbf

Abbildung 6.53 zeigt die Temperaturverteilung in der $Z = 1m$ -Ebene sowie in einem $Y = 1m$ -Schnitt. Außerdem sind die Luftschichten mit einer Temperatur von 20°C als Oberfläche eingezeichnet. Sämtliche Türen der Empfangshalle sind geschlossen, lediglich der Durchgang zum Querbahnsteig ist wie in der Realität ständig geöffnet. Allerdings herrscht im Durchgang keine Druckdifferenz gegenüber der Halle. Die Lufttemperatur außerhalb der Halle beträgt 0°C, allerdings besteht zu diesem Zeitpunkt kein Luftaustausch mit dem Außenraum. Die Innenraumtemperatur und die Oberflächentemperatur der Wände liegen zu Beginn der Simulation bei 10°C, die Temperatur der Türen bei 5°C und die Abluft des ServicePoints bei 20°C.

Die Abbildung zeigt die thermische Situation in der Halle nach einer Betriebszeit von 30 Sekunden. Vor dem ServicePoint bildet sich eine Wolke mit 20°C warmer Luft, die auch die davor wartenden Personen umhüllen würde. Darüberhinaus wird etwa die Hälfte der Halle auf der Schnitthöhe von einem Meter um 1-2K erwärmt. Der vertikale Längsschnitt zeigt ebenfalls eine Durchmischung der warmen Abluft mit der kalten Luft in der Halle an, da sich über dem ServicePoint ein etwa 14 - 15°C warmes Strömungsgebiet herausbildet, welches unter der Hallendecke in Richtung Ausgang Süd treibt.

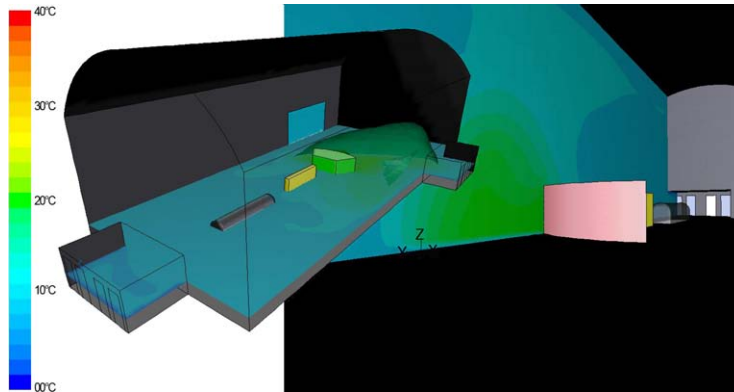


Abbildung 6.53: Temperaturverteilung in der Z-, Y- und T=20°C-Ebene

Die Richtung der Luftbewegung ist in der Darstellung der Strömungspfade in Abbildung 6.54 nachvollziehbar. Solange keine der Türen geöffnet wird und auch der ServicePoint nicht abgeschaltet wird, ist dieser thermische Zustand in der Halle stabil.

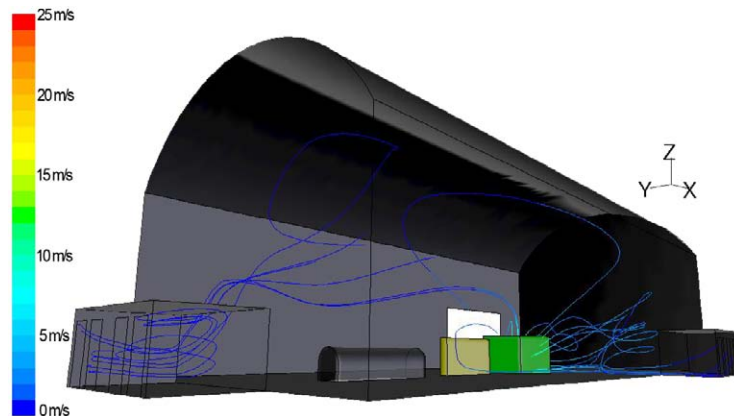


Abbildung 6.54: Strömungspfade und -geschwindigkeit

Dieser scheinbar stationäre Zustand wird gestört, wenn eine Tür geöffnet wird, Abbildung 6.55. Durch die Temperatur- und Druckunterschiede in und außerhalb der Halle entsteht eine Zugluftsituation im südwestlichen Quadranten⁴ der Halle. Aufgrund der Aufstellung der Einbauten und der Orientierung des ServicePoints werden die Bereiche im Osten⁵ und im Norden⁶ kaum beeinflusst. Die Luftgeschwindigkeit auf dem Vorplatz wurde mit 5 m/s angenommen. Die Luft strömt orthogonal auf den Zugang des Empfangsgebäudes zu.

Das Öffnen einer zweiten Tür im südlichen Zugangsbereich bewirkt, daß nun die gesamte südliche Hallenhälfte mit kalter Luft durchströmt wird. Die Darstellung der Strömungspfade im rechten

⁴positive Y-Richtung und negative X-Richtung

⁵negative Y-Richtung

⁶positive X-Richtung

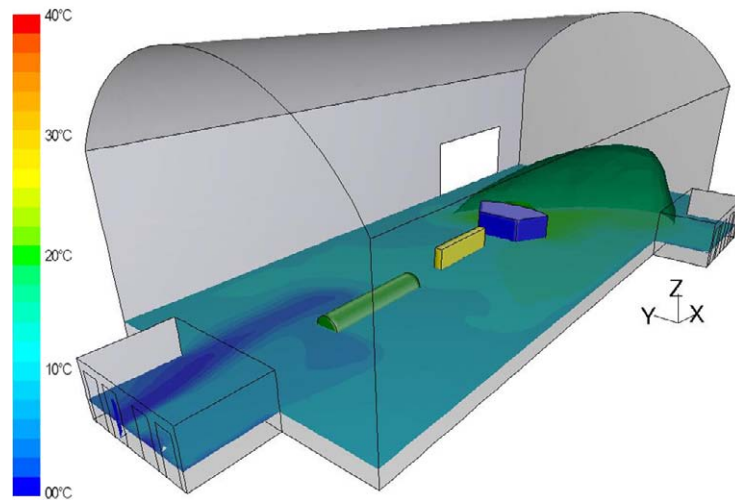


Abbildung 6.55: Öffnen einer Tür im Zugangsbereich Süd

Teil der Abbildung 6.56 zeigt, daß der Luftaustausch mit dem ServicePoint nun nicht mehr über langsame Strömungen über die gesamte Hallenhöhe vonstatten geht, sondern sich schnelle, flache Strömungen auf dem Höhenniveau der Personen im Bahnhof ergeben. Der Überdruck der warmen Luft im Bereich vor dem ServicePoint und die dort vorherrschenden hochturbulenten Luftverwirbelungen sind allerdings immer noch in der Lage, die Kaltluftströmungen abzubremsen, bevor sie das nördliche Hallenende und damit die Personen vor dem ServicePoint erreichen können. Abbildung 6.57 zeigt die Verteilung des Turbulenzgrades der Luft in der Halle bei geschlossenen Türen (links) und zwei geöffneten Türen im südlichen Zugang (rechts).

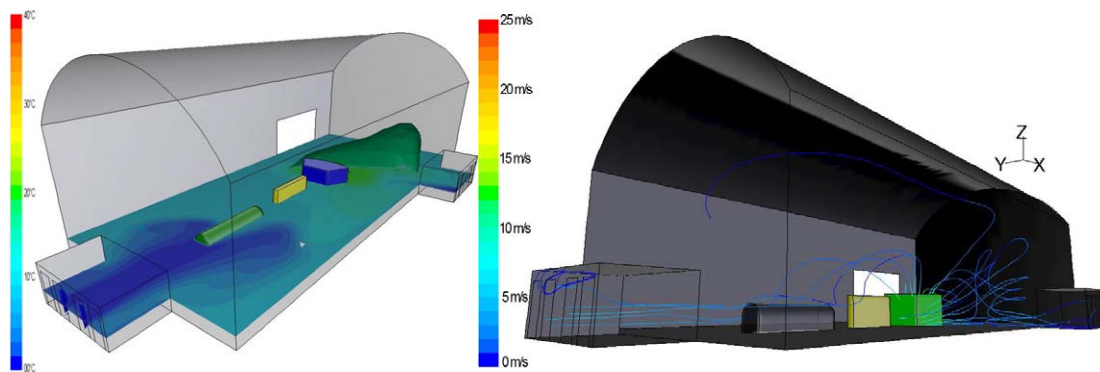


Abbildung 6.56: Öffnen einer zweiten Tür im Zugangsbereich Süd

Die Abbildungen 6.58 und 6.59 zeigen die Temperaturverteilung in der Halle beim Öffnen einer Tür im Osten sowie beim Öffnen von Türen im Süden *und* Osten. Es zeigt sich, daß der Kaltluftstrom, der durch die Osttüren in die Halle eindringt und seinen Druck mit der gegenüberliegenden Öffnung zum Quergang ausgleichen kann, in der Lage ist, die Warmluftwolke vor dem ServicePoint zu durchstoßen. In diesem Fall ist also davon auszugehen, daß sowohl die Mit-

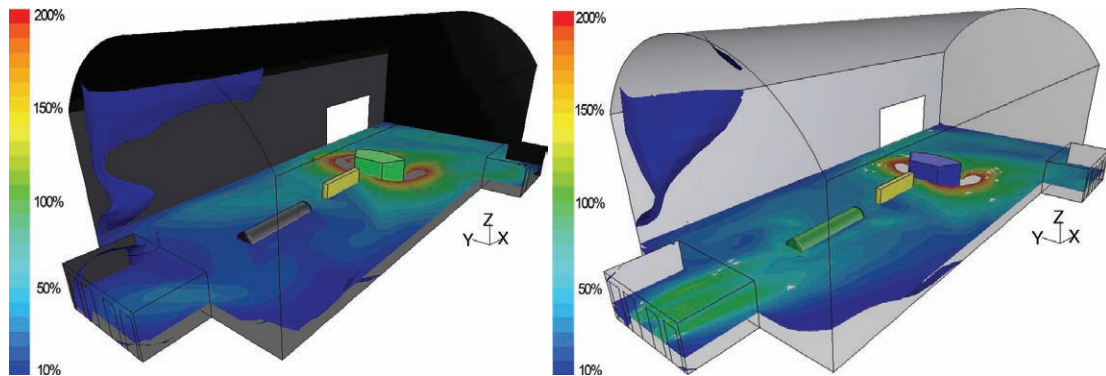


Abbildung 6.57: Turbulenzgrad der Strömung nach 0 und nach 60 Sekunden

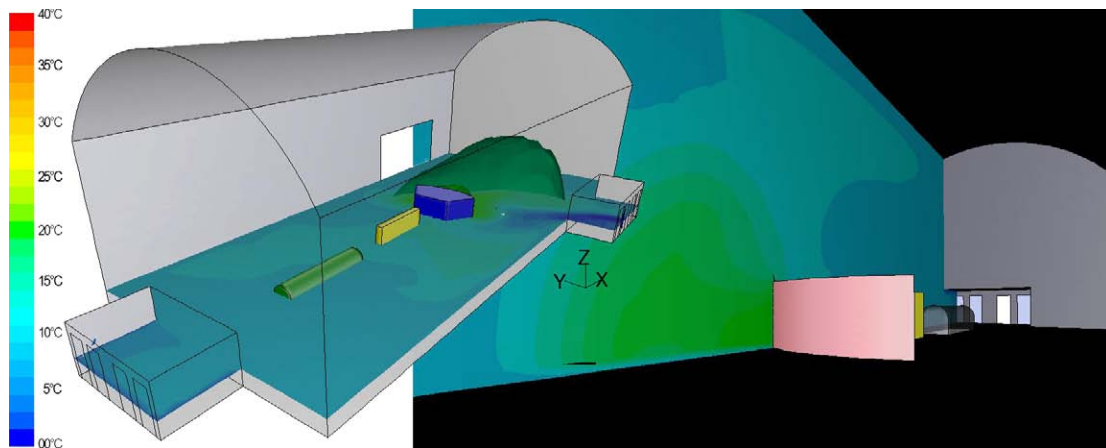


Abbildung 6.58: Temperaturverteilung nach dem Öffnen einer Tür im Osteingang

arbeiter im ServicePoint als auch die Reisenden, die in der Schlange stehen oder bedient werden, unter Zuglufterscheinungen leiden. Beim Öffnen von Türen im Süden und Osten kommt es zu thermodynamischen Kurzschlüssen zwischen den Zugängen und dem Quergang. Die einströmende kalte Luft sowie die vom ServicePoint erhitzte Luft erzeugt Druckunterschiede, die sich in zwei Übergängen nach außen und einem Übergang zum Querbahnsteig ausgleichen können.

Die Abbildungen 6.60 und 6.61 zeigen die Strömungsrichtung der Luft an, bevor, während und nachdem eine Tür geöffnet wird. Im geschlossenen Zustand ergeben sich langsame, großflächige und vertikale Wirbel, die für einen Wärmeaustausch zwischen der Wärmequelle *ServicePoint* und der Wärmesenke *Stahltüren* sorgen. Die warme Luft des ServicePoints steigt auf, bewegt sich unter der Hallendecke auf die Ausgänge zu, verwirbelt in den Eingangsbereichen mit niedriger Deckenhöhe und strömt als kalte Luft auf niedrigem Höhenniveau wieder zurück. In dem Moment, in dem die Tür geöffnet wird, entsteht von draußen ein hoher Druck, sodaß für einen kurzen Augenblick der Luftkreislauf unterbrochen wird. Kurze Zeit später stellt sich eine neue Luftbewegung ein. Kalte Luft drückt in die Halle und bildet eine annähernd laminare Strömung in der südlichen Hallenhälfte. Die Luftwirbel, die einen Wärmeaustausch zwischen der warmen Abluft des Service-

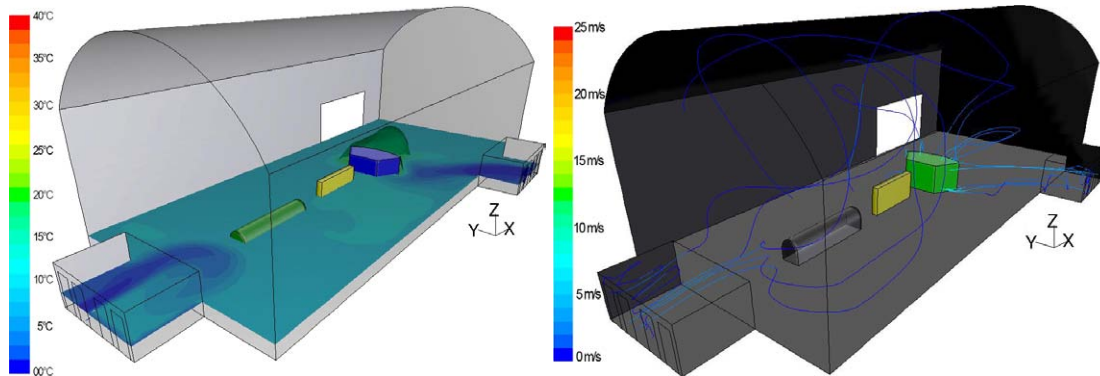


Abbildung 6.59: Temperaturverteilung und Strömungsgeschwindigkeiten, drei offene Türen

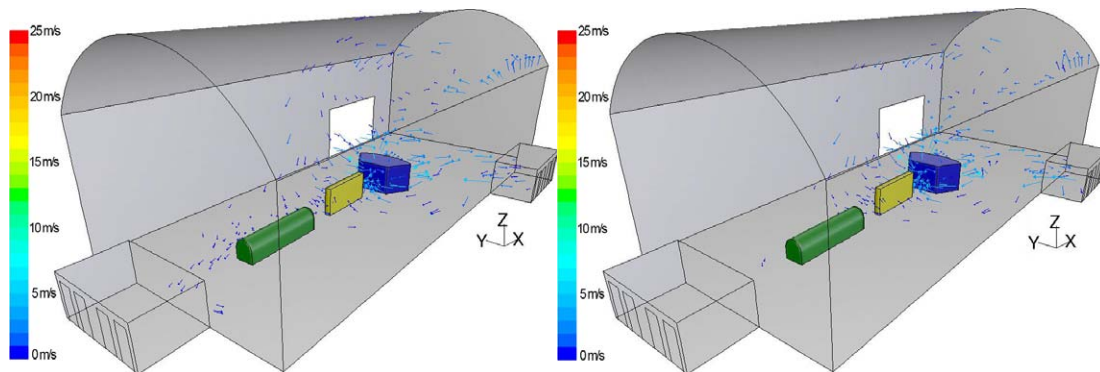


Abbildung 6.60: Richtungsvektoren der Strömung vor und beim Öffnen einer Osttür

Points und der kalten Zuluft erzeugen, werden enger zusammengedrückt und auf den Bereich um den ServicePoint beschränkt. Darüberhinaus stellt sich ein Luftaustausch mit dem Quergang und zum Querbahnsteig ein, da in der Halle Bereiche unterschiedlichen Luftdrucks entstehen, die sich über den Querbahnsteig ausgleichen können. Dies führt zu einem weiteren Eintrag kalter Luft in das System Empfangshalle.

Bewertung und Analyse der Simulationsergebnisse

Die thermischen Simulationen des Empfangsgebäudes in Darmstadt zeigen, daß der Energiebedarf eines *Warmbahnhofs* mit im Winter beheizter Empfangshalle mehr Energie verbraucht als ein Empfangsgebäude mit thermisch unregelter Empfangshalle und einzeln beheizten Gewerbezonen, jedoch ohne ServicePoint. Unter der Annahme einer energetischen Sanierung des Bahnhofs beträgt der jährliche Heizenergiebedarf für die Halle 60MWh/a . Die jährliche Energieeinsparung in den Nebenzonen dagegen 36MWh . Der Mehrverbrauch würde also $60\text{MWh} - 36\text{MWh} = 24\text{MWh}$ betragen. Der ServicePoint, der bisher noch nicht in der Bilanz berücksichtigt wurde, hat eine maximale Anschlussleistung von 21kW [110]. Bei einer angenommenen Betriebsdauer

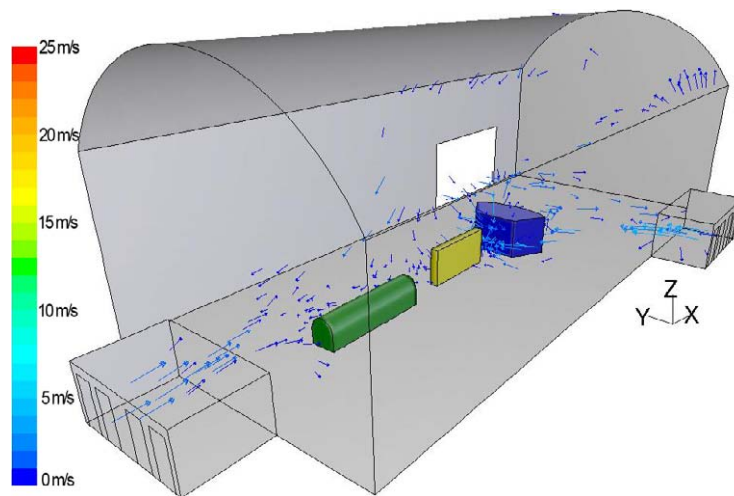


Abbildung 6.61: Richtungsvektoren der Strömung nach dem Öffnen einer Ost- und Südtür

von 14 Stunden pro Tag und 365 Tagen im Jahr Grundlast EDV von 1KW zuzüglich einer Spitzenlast für Beheizung in Höhe von 20kW an 100 Tagen im Jahr, steuert der ServicePoint $14 * 100 * 20kWh = 28MWh$ Wärme und ganzjährig 1kW Abwärme während der Betriebszeit bei. Unter diesem Gesichtspunkt würde die Gesamtenergiebilanz beider Varianten ebenbürtig sein und etwa gleich effizient bzw. gleich ineffizient ausfallen. Mit anderen Worten: Die Beheizung der Empfangshalle ist genau dann effizient, wenn der ServicePoint sehr ineffizient ist.

In der Strömungssimulation, die den Bestand abbildet, fungiert der ServicePoint als Heizung der Halle. Solange die Türen der Empfangshalle geschlossen sind, entsteht im und vor dem ServicePoint eine Warmluftwolke. Ein Großteil der warmen Luft steigt in die Hallenkuppel und wird in der Nähe der Zugänge abkühlt. Es stellen sich makroskopische, vertikale Luftwirbel ein, die für einen Luft- und Wärmeaustausch in der Halle sorgen. Ungünstigerweise werden die Personen in der Empfangshalle nur vom kalten Luftstrom von den Hallenrändern zum ServicePoint erfaßt. Die warme Luft strömt in unerreichbaren Höhen unter der Innenkuppel. Die Energiebilanz beider Varianten suggeriert eine Ebenbürtigkeit, die aber die lokalen Temperaturdifferenzen und damit Nutzbarkeit der vorhandenen Wärmeenergie außer Acht läßt.

Sobald die Türen der Halle geöffnet werden, wird die gleichmäßige Luftbewegung in der Halle gestört, und Warmluft fließt nach außen ab.

Aus den Ergebnissen lassen sich verschiedene Strategien ableiten:

1. *Reduktion der Wärmeverluste des ServicePoints.* Dadurch wird die Empfangshalle als passiver Puffer die deutlich energieeffizientere Variante. Die Kunden und Mitarbeiter in der Empfangshalle sollten gegen Zugluft geschützt werden, sodaß für sie ein Gefühl thermischer Behaglichkeit entsteht. In dieser Variante kann davon ausgegangen werden, daß Bekleidung und Aktivitätsgrad in Form von Bewegung sowohl im als auch außerhalb des ServicePoints dem Temperaturniveau angemessen ist. Für Langzeitwartende müßten beheizte Wartezonen angeboten werden.

2. *Nutzung der Abwärme des ServicePoints.* In diesem Fall müßte die warme Luft unter der Kuppel nach unten gepumpt werden. Zuglufterscheinungen in der Halle wären absolut zu vermeiden, weswegen Luftschleieranlagen an den Türen den Luftausgleich bei starken Temperaturgefällen zwischen innen und außen unterbinden sollten. Durch die Luftschleieranlagen in der äußeren Gebäudehülle würden die Luftschleieranlagen im Inneren des Empfangsgebäudes (Reisezentrum und Gastronomie) überflüssig. Der Nachteil dieser Variante bestünde darin, daß der ServicePoint mit hochwertiger elektrischer Energie beheizt wird, die Primärenergieeffizienz also relativ schlecht im Vergleich zu den anderen Varianten wäre.
3. *Beheizte Empfangshalle - Warmbahnhof.* Auch in dieser Variante müßte der Luftaustausch mit dem Außenbereich über die Zugangstüren auf ein Minimum beschränkt werden. Der Vorteil dieser Variante liegt in dem niedrigen technischen Ausstattungsgrad des ServicePoints, der bis auf die EDV keine elektrischen Anlagen mehr bräuchte und offen gestaltet sein könnte. Zur Erwärmung der Halle müßte keine elektrische Energie verbraucht werden, die Variante wäre unter dem Gesichtspunkt des Primärenergieeinsatzes effizient. Nachteilig dürfte das Komfortempfinden der Kunden in der Halle sein, da diese ihre Kleidung gemäß Außenklima wählen und einen hohen körperlichen Aktivitätsgrad aufweisen. Im Winter könnte es also zu einem unangenehmen Wärmeschock und Schwitzen beim Betreten der Halle kommen.
4. *Nutzung des natürlichen Auftriebs.* In dieser Variante müßten die Service-Mitarbeiter und die Wartenden auf einem höheren Niveau in der Halle sitzen, während schnell laufende Reisende sich unter ihnen im Kaltluftsee auf dem Boden der Halle bewegen. Bei dieser Variante müßten keine besonderen thermischen und strömungsmechanischen Vorsichtsmaßnahmen an den Zugängen zur Halle vorgenommen werden. Von Nachteil wäre die schlechtere Übersichtlichkeit sowie die Notwendigkeit vertikaler Bewegungen, die vor allem für Menschen mit viel Gepäck oder mit Gehbehinderungen inakzeptabel wäre.
5. *Thermische Schleusen.* Durch den Einsatz von klassischen Windfängen in Form von doppelten automatischen Schiebetüren oder Luftschleieranlagen würde der Luftzug in der Halle reduziert und durch den Wegfall von Luftschleieranlagen im Innern der Halle teilweise kompensiert. Diese Variante würde aber möglicherweise die Personenströme an den Zugängen empfindlich stören.

Eine thermische Hülle bezüglich Temperatur um das gesamte Empfangsgebäude wäre spätestens dann unsinnig, wenn der ServicePoint energetisch optimiert wird. Eine thermische Hülle bezüglich Luftdruck ist jedoch in fast allen Varianten sinnvoll, da dadurch weniger Zugluft in der Halle und weniger lokale Luftschleieranlagen an den Übergängen zwischen Empfangshalle und den gewerblichen Nebenzonen notwendig wären. Aus diesem Grund soll im nächsten Abschnitt das thermische und strömungsmechanische Verhalten des ServicePoints im Detail betrachtet werden. Die strömungsmechanischen Voraussetzungen für Luftzug sind maßgeblich von den Zugängen und der geometrischen Konstellation der Innenarchitektur abhängig. Die Auswirkungen dieser Varianten auf die Funktionalität der Kunden- bzw. Reisendenbewegung werden in Kapitel 7 am Beispiel des Reisezentrums Frankfurt Hbf betrachtet.

6.2.3 Redesign ServicePoint

Untersucht und simuliert wird an dieser Stelle nur der Neuentwurf des ServicePoints, der seit dem Jahr 2007 sukzessive den bisherigen Typ ersetzt, siehe dazu Abbildungen 6.20 bis 6.22 in Abschnitt 6.1.2.

Die thermische Funktionsweise beider Typen unterscheidet sich wie folgt: Die Mitarbeiter im bisher eingesetzten ServicePoint werden vor allem durch Heizstrahler beheizt, die innen an der Blende oberhalb der Öffnung angebracht sind. Eine Fußbodenheizung sorgt für Wärme von unten. Im ursprünglichen Zustand strahlten auch die Türen der Möbel im Rücken der Mitarbeiter Wärme ab. Aufgrund technischer Mängel sind diese Flächenstrahler nicht mehr in Betrieb, stattdessen werden mobile Heizlüfter eingesetzt. Aufgrund der großen Öffnung zum Kundenbereich und fehlender Windschutzscheiben gibt es eine Luftschleieranlage in der Ebene der Blende. Ein großer Anteil der Mitarbeiter im alten ServicePoint klagte im Winterhalbjahr über thermische Unbehaglichkeit aufgrund Kälte und Zuglufterscheinungen. Dies wird in Abschnitt 4.3 näher untersucht. Ein Grund für die Beschwerden könnten tatsächliche zugige, also schnelle und / oder turbulente Luftströmungen sein, oder auch aus Asymmetrien in der Strahlungswärme resultieren. Daher wurde beim Redesign des ServicePoints das thermische Konzept grundsätzlich verändert. Anstelle der Strahlungswärme wird konvektive Wärme eingesetzt. Die erwärmte Luft wird im Bereich der Füße eingeblasen und soll am kompletten Körper der Angestellten vorbei nach oben strömen. Daraus resultieren theoretisch drei Vorteile:

1. Reduktion des Diskomforts aufgrund von Strahlungsasymmetrien
2. Verminderung der Zuglufterscheinungen durch thermischen Überdruck im Innern des ServicePoints
3. Höhere Temperaturen im Fuß- und Beinbereich im Gegensatz zum Kopfbereich

Des weiteren wurden beim Redesign gläserne, strömungsmechanische 'Scheuklappen' eingebaut, die den Einfluß der äußeren Luftströmungen im Innern minimieren sollen. Die Größe der Öffnungsfläche wurde ebenfalls minimiert, was aber angesichts des konvektiven Wärmeverlustes aufgrund von Überdruck im Innern keinen positiven Beitrag leisten dürfte. Stattdessen sind durch diese Maßnahme höhere Geschwindigkeiten beim Austritt der warmen Luft durch die Öffnung zu erwarten.

Ergebnisse der Strömungssimulation

Die Simulationen des ServicePoints beschreiben verschiedene Varianten von Randbedingungen, die Geometrie und Funktionsweise des ServicePoints ist immer gleich. Zunächst wird wie bei der Strömungssimulation der Empfangshalle in Abschnitt 6.2.2 die Luftausbreitung im ServicePoint ohne Störung von außen betrachtet. In einem zweiten Durchgang wird ein kaum spürbarer Luftstrom mit einer Geschwindigkeit von $0,5\text{ m/s}$ parallel zur Öffnung des ServicePoints angenommen. Luftgeschwindigkeiten sind wie in Abschnitt 4.3 beschrieben häufig im Empfangsgebäude messbar. Als dritte Variante wird eine für die Verhältnisse in Innenräumen starke Luftbewegung mit einer Geschwindigkeit von 5 m/s angenommen, ebenfalls parallel zur Öffnung. Zuletzt wird die

Einströmrichtung variiert und der starke Luftstrom um einen Winkel von 53° ausgelenkt. Die Varianten und Randbedingungen sind in Abbildung 6.62 zusammengefaßt.

1. Simulation: Interne Wärmeausbreitung
• Innenraumtemperatur = 10°C
• Temperatur Heizplatten = 95°C
• Temperatur Heizluft = 30°C
• Geschwindigkeit Heizluft = $0,5\text{ m/s}$
• Temperatur Seitenwände = 5°C
• Keine äußere Luftströmung
2. Simulation: Paralleler Luftstrom
• Luftgeschwindigkeit = $0,5\text{ m/s}$
• Richtung = 0° zur Öffnung
• Temperatur Zuluft = 5°C
3. Simulation: Paralleler Luftstrom
• Luftgeschwindigkeit = 5 m/s
4. Simulation: Schräger Luftstrom
• Richtung = 53° zur Öffnung

Abbildung 6.62: Simulationsvarianten Redesign ServicePoint

Abbildung 6.63 zeigt die dynamische Wärmeausbreitung in einem ServicePoint. Zum Zeitpunkt $t = 0\text{ s}$ ist der ServicePoint noch außer Betrieb, die Innenraumtemperatur beträgt 10°C , die Oberflächentemperatur der Außenbauteile 5°C . Nach 60 Sekunden (linke Seite der Abbildung) stellt sich in und vor dem ServicePoint eine angenehme Lufttemperatur von etwa 20°C ein. Nach insgesamt 135 Sekunden ist der Innenraum überhitzt. Die Temperatur fällt jedoch schlagartig an der Ebene der Blende. Außerhalb des ServicePoints herrschen nach wie vor behagliche Temperaturen.

In Abbildung 6.64 wird die Ausbreitung der warmen Luft aus einer anderen Perspektive betrachtet und anhand von Isothermen⁷ der Temperaturwerte 20°C (grün), 25°C (gelb) und 30°C (orange) dargestellt.

In der folgend beschriebenen Simulation wird eine schwacher Luftstrom mit $v_{\text{luft}} = 0,5\text{ m/s}$ parallel zur Blende und Öffnung angenommen.

In Abbildung 6.65 werden die veränderten Strömungsverhältnisse anhand von Strömungspfaden verdeutlicht. Die vorbeiströmende kalte Luft dringt nicht in den ServicePoint ein, sondern nur in den Bereich vor der Blende, der durch einen umlaufenden Glasrahmen geschützt ist. Die Temperaturen auf Kopfhöhe der Mitarbeiter haben ein behagliches Niveau um 20°C , während der Fußraum nach wie vor zu warm ist.

Nachfolgend wird ein sehr starker paralleler Luftzug bzw. Windstoß mit einer Geschwindigkeit von 5 m/s angenommen. Die Temperaturverteilung in und vor dem ServicePoint ist in Abbildung 6.66 zu erkennen. Während sich die Luft im Bereich der Warteschlange, dargestellt durch einen schwarzen Boden, deutlich abkühlt, bleibt die Lufttemperatur für die Kunden direkt am Tresen behaglich warm. Grund dafür ist der umlaufende Windschutzrahmen. Die Temperatur im

⁷Oberflächen gleicher Temperatur

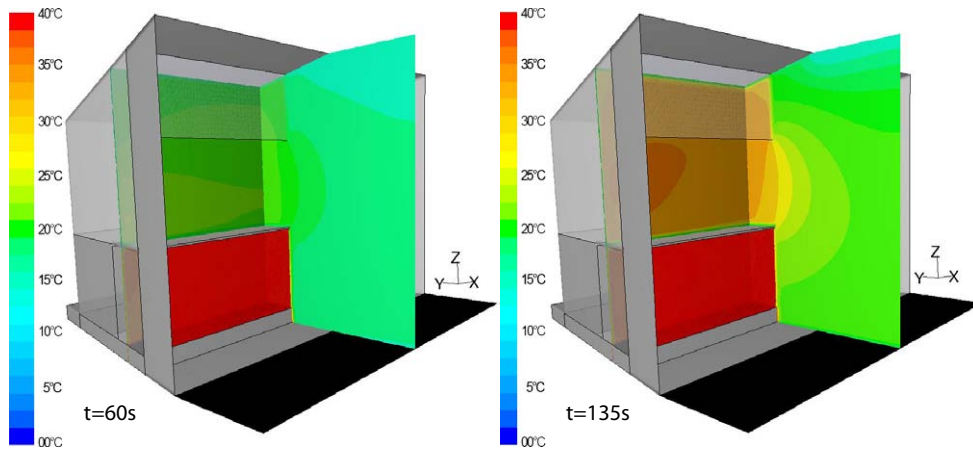


Abbildung 6.63: Interne Wärmeausbreitung im ServicePoint nach 60 und nach 135 Sekunden

Innern des ServicePoints kühlt sich zwar etwas ab, hat aber aufgrund Überhitzung während der Windstille genügend Reserven.

Einen besseren Eindruck über die räumliche Verteilung und die zeitliche Abhängigkeit der Lufttemperatur im ServicePoint gibt Abbildung 6.67. Dauert die Windbö maximal 10 Sekunden, ist für keinen Mitarbeiter im ServicePoint mit Komforteinbußen zu rechnen. Dauert der starke Luftzug jedoch 20 Sekunden oder länger, so bleibt nur der Mitarbeiter im Windschatten des umlaufenden Rahmens auf der Seite des Einströmgebietes geschützt. Der Mitarbeiter oder die Mitarbeiterin auf der gegenüberliegenden Seite spürt zwischenzeitlich deutlich kältere Luft, da die warme Umgebungsluft durch den Sog des Windstoßes mitgerissen wird, und in der kurzen Zeit nicht genügend warme Luft von unten nachströmt.

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben spielt jedoch nicht nur die Lufttemperatur eine entscheidende Rolle für das Erleben thermischen Komforts. Die Strahlungstemperatur hängt im Falle der Abwesenheit von technischen Strahlungsgeräten hauptsächlich von der Oberflächentemperatur der Konstruktion und Einbauten des ServicePoints ab. Diese nehmen die Temperatur der Umgebungsluft an, reagieren aber deutlich träger als Luft und lassen sich durch kurze Windstöße nicht

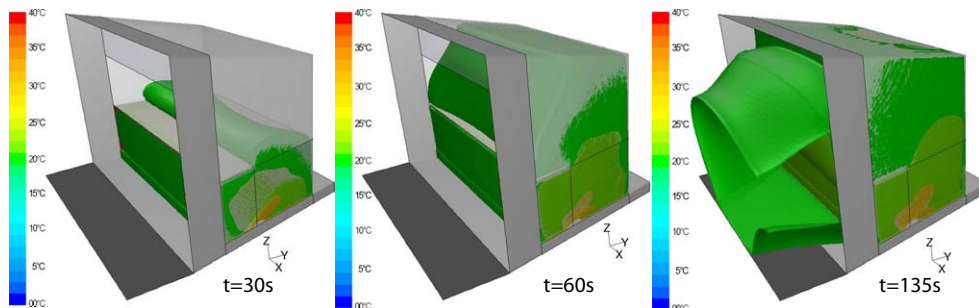


Abbildung 6.64: Interne Wärmeausbreitung im ServicePoint nach 30, 60 und 135 Sekunden

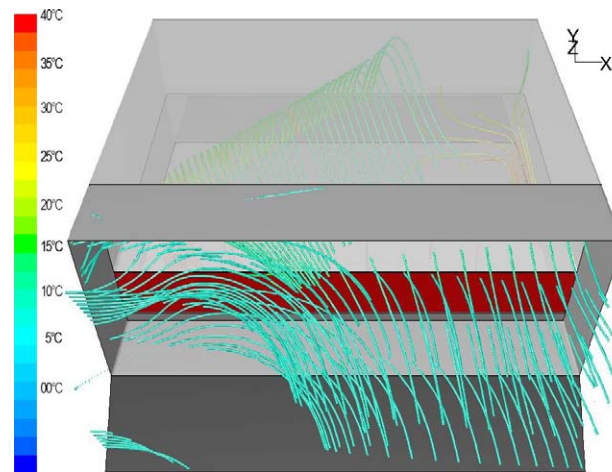


Abbildung 6.65: Strömungspfade bei einem parallelen Luftstrom mit $v=0,5\text{m/s}$

sehr stark beeinflussen. Aus diesem Grund wird die Strahlungstemperatur in der Auswertung der Simulation nicht weiter berücksichtigt. Stattdessen spielt der Parameter Luftgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle. Abbildung 6.68 zeigt die Strömungspfade und farblich die zugehörige Strömungsgeschwindigkeit vor und während eines Windstoßes mit einer Geschwindigkeit von 5m/s . Bei Strömungsgeschwindigkeiten $\leq 5\text{m/s}$ stellen sich großmaßstäbliche Strömungswirbel mit sehr geringen Geschwindigkeiten ein, die hauptsächlich durch den Auftrieb und Überdruck warmer Luft im ServicePoint zurückzuführen sind. Lediglich an den Rändern des umlaufenden Windschutzrahmes treten lokale Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 5m/s auf. Während des Windstoßes ist die Strömung vor dem ServicePoint nahezu laminar. Die höchsten Luftgeschwindigkeiten werden in der vertikalen Ebene des umlaufenden Rahmens erreicht, der nun wie ein Lufttrichter wirkt. Im

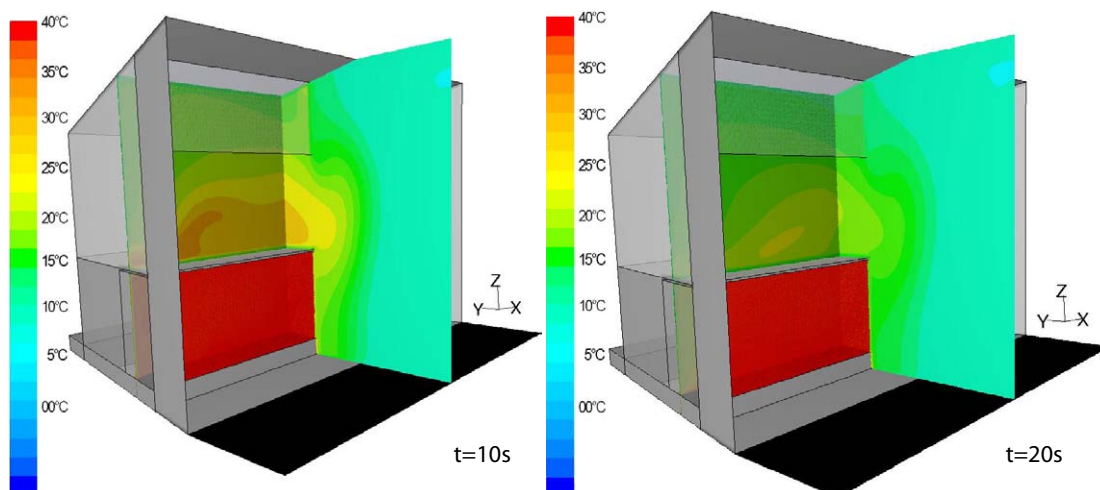


Abbildung 6.66: Darstellung der Temperatur bei einem Windstoß mit 5m/s

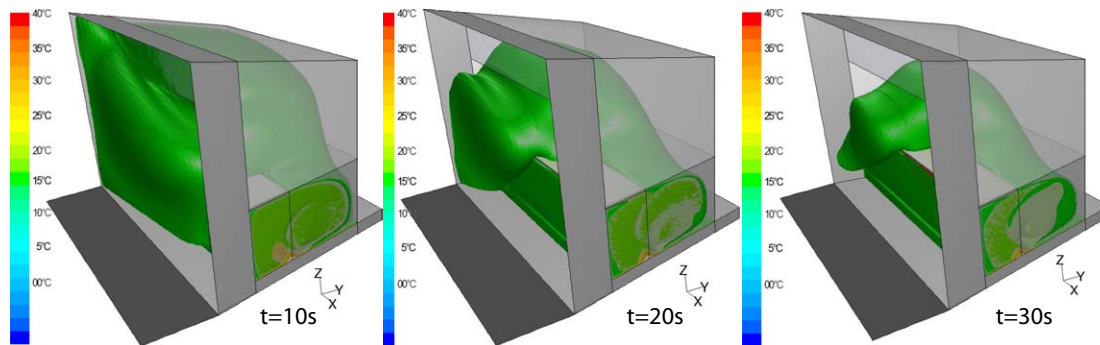


Abbildung 6.67: Darstellung der Temperatur bei einem Windstoß mit 5m/s

ServicePoint liegt der Bereich auf der Seite der Einströmung in einem Windschatten. Die Luft in der Hälfte gegenüber der Einströmung weist dagegen sehr hohe Geschwindigkeiten auf, die aus der Trichterwirkung des Rahmens und dem Überdruck der warmen Luft von unten resultieren. Das Strömungsverhalten nach 20 und 30 Sekunden ähnelt der Situation nach 10 Sekunden sehr stark. Offensichtlich reagieren die Luftgeschwindigkeiten im ServicePoint sehr schnell auf Störungen von außen und besitzen anders als die Temperatur keine nennenswerte Trägheit.

Der parallele Windstoß ist im Falle des in Abschnitt 6.2.2 beschriebenen Darmstädter Hauptbahnhofs der wahrscheinlichste Fall, wenn der Ausgang Ost und der Durchgang zum Querbahnsteig gleichzeitig geöffnet sind. Wie in den Simulationen der Empfangshalle gesehen, verlieren Windstöße, die durch das Öffnen der Südtür verursacht werden, ihre Wirkung, bevor sie den ServicePoint erreichen. Außerdem treffen sie nur auf die Rückwand des ServicePoints. Die Windstöße durch den Osteingang können aufgrund der räumlichen Anordnung nur parallel zum ServicePoint verlaufen.

In anderen Bahnhöfen bzw. bei einem Verschieben des ServicePoints wäre es jedoch denkbar, daß

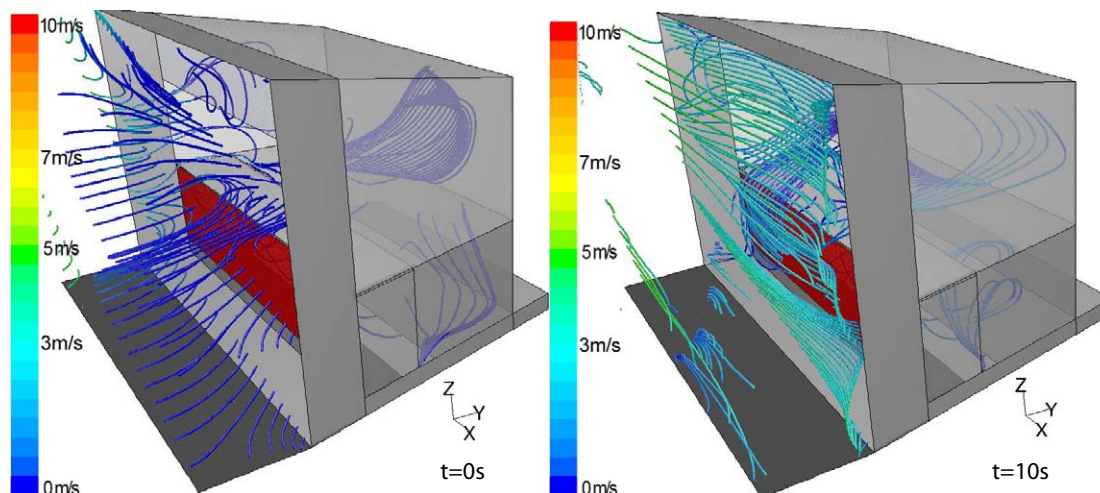


Abbildung 6.68: Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit in m/s

der Windstoß schräg⁸ von vorne auf den ServicePoint trifft. Ziel der nachfolgend beschriebenen Simulation ist die Überprüfung, welche Wirkung der Überdruck der von unten einströmenden warmen Luft sowie der umlaufende Rahmen in diesem Fall haben.

Abbildung 6.69 zeigt die Grenzoberfläche des Luftgebietes mit einer Temperatur von 20°C oder mehr. Dieses Gebiet ist nun relativ klein und umfaßt nur noch den Windschattenbereich auf der Seite der Einströmung. Die dazugehörigen Luftgeschwindigkeiten sind in Abbildung 6.70 dargestellt. Wieder sind die Strömungsgeschwindigkeiten in der senkrechten Ebene des umlaufenden Rahmens am höchsten. Die Strömungen im Innern des ServicePoints scheinen zwar auch verwirbelt zu sein, allerdings mit deutlich geringeren Strömungsgeschwindigkeiten.

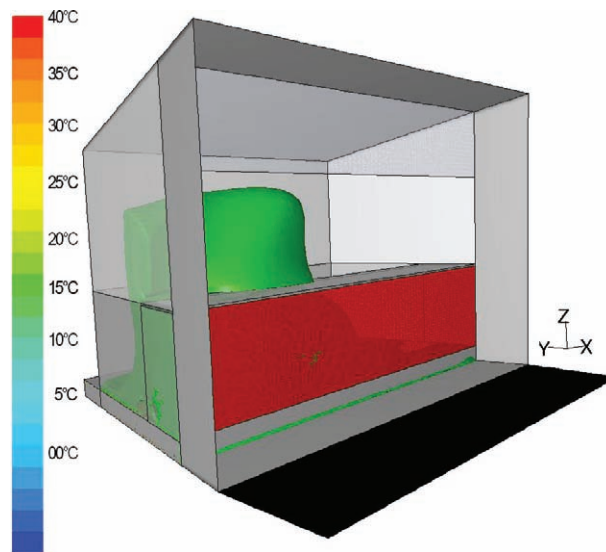


Abbildung 6.69: Thermisch behagliches Luftgebiet bei einem schrägen Luftstrom von 5 m/s

Abbildung 6.71 zeigt, in welchen Bereichen in dieser Variante die Turbulenzen am höchsten sind: In der Ebene des umlaufenden Rahmens, vor allem auf der dem Einströmungsgebiet gegenüberliegenden Seite.

Bewertung und Analyse der Simulationsergebnisse

Die thermodynamischen und strömungsmechanischen Simulationen des ServicePoints zeigen, daß

- die interne Konvektionsheizung den Innenraum voll beheizt
- sich ein Wärmestau hinter der oberen Frontblende unter dem Dach des ServicePoints bildet
- eine große Menge an Wärmeenergie durch das Frontfenster diffundiert, und dadurch der Aufenthaltsbereich der Kunden unmittelbar an der Theke des ServicePoints ebenfalls ständig mit warmer Luft versorgt wird
- bei einer parallelen Anströmung nur wenig Luftaustausch stattfindet
- bei einem Windstoß von schräg vorne sehr viel Zuluft in das Innere des ServicePoints dringt.

⁸in diesem Beispiel unter einem Winkel von 53°

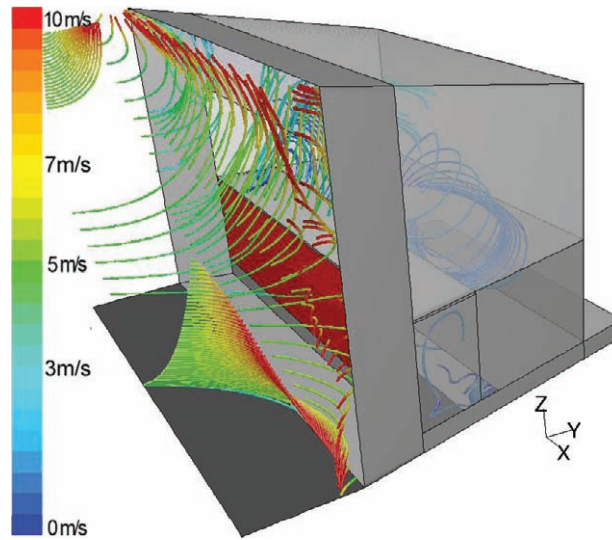


Abbildung 6.70: Luftgeschwindigkeiten bei schräger Einströmung

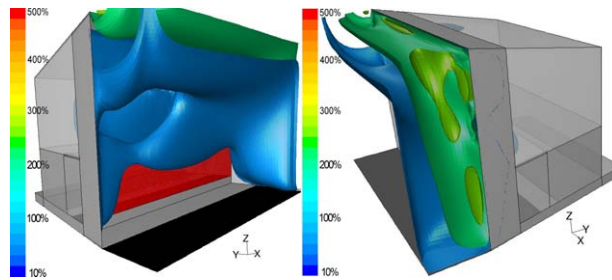


Abbildung 6.71: Turbulenzgrade bei schräger Einströmung

Die Detailsimulation des ServicePoints bestätigt die Annahme der vorhergegangenen Untersuchung der gesamten Empfangshalle in dem Aspekt der kontinuierlichen Wärmeenergieabgabe an die gesamte Halle. Die obere Frontblende des ServicePoints mag zwar die Gesamtenergiebilanz des ServicePoints verbessern. Allerdings ist ein Warmluftsee im Kopfbereich der Mitarbeiter unter Behaglichkeitsgesichtspunkten negativ zu beurteilen. Der Warmluftbereich vor dem ServicePoint ist nicht nur unter energetischen Gesichtspunkten ungünstig. Da die Kunden anders als die Mitarbeiter keine Innenraumkleidung tragen, sollte die Lufttemperatur abhängig von der Wartezeit und dem damit verbundenen Stoffwechsel eher der Temperatur in der gesamten Halle und der Umgebungstemperatur entsprechen. Der umlaufende Rahmen entfaltet bei moderaten Luftgeschwindigkeiten einen guten Schutz gegen konvektiven Wärmeaustausch mit bewegter Zuluft. Bei höheren Zuluftgeschwindigkeiten funktioniert der Rahmen jedoch wie ein Trichter und beschleunigt die Luft, sodaß sich in dem von ihm umfaßten Raum hohe Luftgeschwindigkeiten und hohe Turbulenzgrade einstellen, die den Komfort für Kunden und Mitarbeiter stören.

Die Simulationen zeigen, daß alle Elemente und Parameter des ServicePoints wie der Überdruck warmer Luft, Frontblende, umlaufender Rahmen etc... in bestimmten Situationen gut funktionie-

ren. Bei Änderung der Rahmenbedingungen oder auch einfach nach einer gewissen Zeit ist die Wirkung jedoch kontraproduktiv. Wie bereits die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Simulationen zeigen auch diese Ergebnisse, daß der ServicePoint in Abhängigkeit der Zeit und der thermischen und betrieblichen Randbedingungen geregelt sein sollte.

6.2.4 Reisezentrum Frankfurt am Main

Das Reisezentrum ist neben dem ServicePoint ein weiterer Raum im Bahnhof, in dem Bahnangestellte arbeiten und Kunden Informationen sowie Fahrscheine erhalten. Anders als beim ServicePoint betreten die Reisenden dieselbe Klimazone, in der sich auch die Bahnmitarbeiter befinden. Die klimatische Grenze befindet sich also nicht zwischen Kunden und Angestellten, sondern wird von den Kunden durchschritten. Reisezentren gibt es wie ServicePoints auch nur in größeren und verkehrsreichen Bahnhöfen mit einem Empfangsgebäude. Die räumliche Struktur und seine Anbindung an die Empfangshalle ist von Bahnhof zu Bahnhof unterschiedlich. Im Darmstädter Hbf ist das Reisezentrum durch lediglich eine Tür von der Empfangshalle aus erreichbar. Strömungsmechanisch gesehen ist das Reisezentrum dort eine Sackgasse. Im Frankfurter Hbf ist das Reisezentrum hingegen aus drei Richtungen erreichbar:

1. Von Norden, aus der Empfangshalle
2. Von Westen, vom Querbahnsteig aus
3. von oben, der Galerie der Lounge und den Büros des Bahnhofsmanagements

Die seitlichen Zugänge sind mit automatischen Schiebetüren versehen und sind je nach Kundenaufkommen permanent geöffnet, geschlossen oder in ständigem Wechsel zwischen beiden Zuständen.

Während der Heizperiode kommt es an Tageszeiten mit hohem Kundenaufkommen zu Überlagerungen der horizontalen Luftströme zwischen den seitlichen Ausgängen mit vertikalen Wirbeln, die sich aufgrund des natürlichen Auftriebs einstellen. Das Resultat sind Zuglufterscheinungen, die Mitarbeiter an den Servicetheken beschwerten sich über ihrem Empfinden nach zu kalte Luft. In der Folge wurden lokale Heizlüfter aufgestellt, und an einigen Schiebetüren blasen Luftschleieranlagen über 25°C warme Luft mit einer Strömungsgeschwindigkeit von mehr als $2,5\text{ m/s}$ nach unten. Diese Maßnahmen können das thermische Problem nur unzureichend mindern, verursachen aber einen großen Energiebedarf. Daher soll mit Hilfe einer dynamischen, thermischen Gebäudesimulation überprüft werden, welche energetischen Folgen der Umbau des nördlichen Zugangs in einen Schleusenraum hätte. Die Beschreibung der Varianten befindet sich in Abschnitt 6.1.1 und wird durch die Abbildungen 6.13 und 6.14 verdeutlicht.

Ergebnisse der dynamisch thermischen Simulation

Abbildung 6.72 zeigt den Jahrestemperaturverlauf und den dazugehörigen Heizwärmebedarf im Bestand. Die zentrale Heizungsanlage ist so geregelt, daß die Lufttemperatur tagsüber 22°C und nachts 18°C nicht unterschreitet. Eine Überhitzung im Sommer droht nicht. Durch die Höhe des

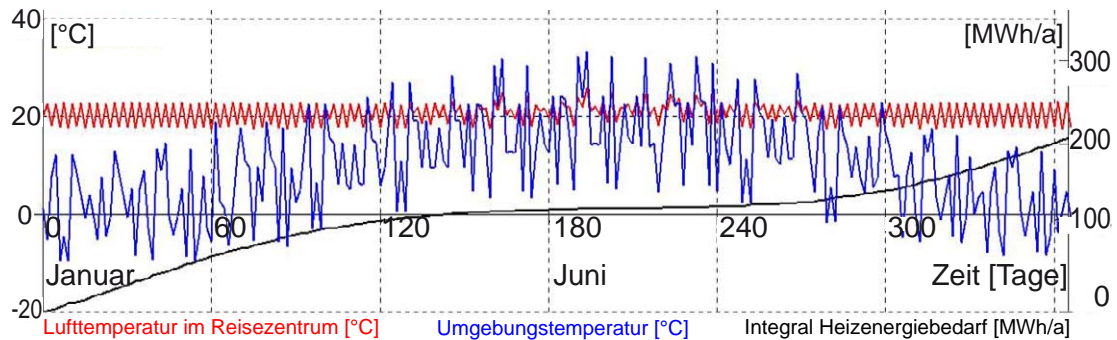


Abbildung 6.72: Jahrestemperaturverlauf und -energiebedarf Reisezentrum Ffm Hbf im Bestand

Raumes bis in den 2.Stock wird viel Wärme durch den natürlichen Auftrieb nach oben transportiert. Die großen thermischen Speichermassen aus massivem Stein sorgen außerdem für eine gute Pufferung der Temperaturspitzen. Allerdings sind die Wärmeverluste im Winter so groß, daß jährlich ein Gesamtwärmeenergiebedarf von über 200 MWh entsteht.

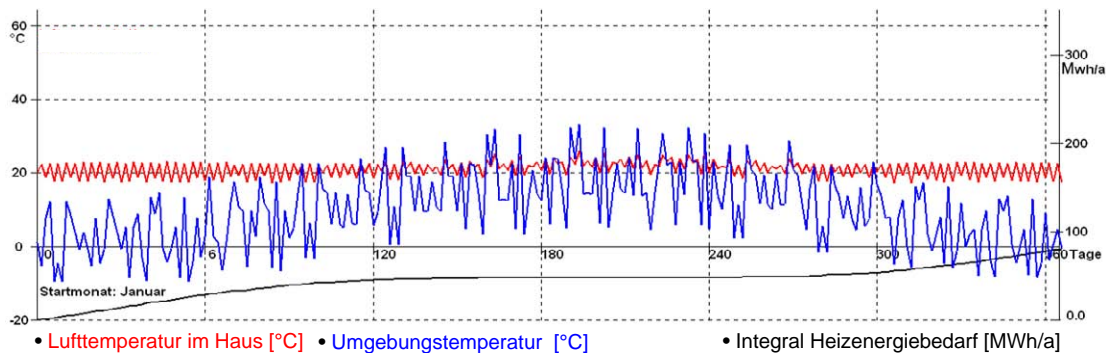


Abbildung 6.73: Jahrestemperaturverlauf und -energiebedarf Reisezentrum mit Windfang

Durch die Ausbildung von Schleusenräumen kann der konvektive Wärmeverlust deutlich reduziert werden. Zum einen ist die Wahrscheinlichkeit, daß alle Türen gleichzeitig offenstehen, geringer als im Bestand. Zum anderen würden bei der Anordnung der Fahrscheinautomaten und Informationsregalen gar nicht mehr alle Kunden bis in das eigentliche Reisezentrum vordringen, sondern ihre Fahrscheine und Informationen im Pufferbereich besorgen und dann in die Empfangshalle zurückkehren. Nicht zuletzt würde bei einer thermischen Abspaltung des Informationsbereichs als eigenständige Pufferzone das zu beheizende Volumen des Reisezentrum begrenzt werden. Das Resultat ist in Abbildung 6.74 abzulesen: Der Heizwärmebedarf für das Reisezentrum würde sich um etwa 60% reduzieren.

Bewertung und Analyse der Simulationsergebnisse

Die Gesamtbilanz beider Varianten ist in Abbildung 6.74 dargestellt. Allerdings ist zu überprüfen, ob und wie sehr die Ausbildung einer thermischen Schleuse den Personenstrom in das Reisezen-

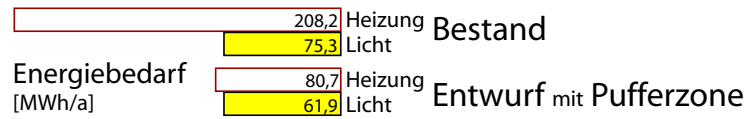


Abbildung 6.74: Energiebilanz der beiden Varianten für das Reisezentrum Frankfurt(M) Hbf

trum und wieder hinaus behindert. Dazu soll das in Kapitel 7 vorgestellte Verfahren dienen. Eine stärkere Ausnutzung der vorhandenen Wärme im Winter könnte auch durch eine geeignete Unterbindung des natürlichen thermischen Auftriebes erfolgen, was nicht zu einer Störung der Reisendenbewegung, möglicherweise aber zu anderen Nachteilen führen könnte:

Maßnahme	Vorteil	Nachteil
Deckensegel, Membran Ventilator	Reduzierung thermischer Höhe	Störung Sichtbeziehung Galerie
Wärmerückgewinnung	Umwälzung warmer Luft	Zusätzliche Luftbewegung
	Entlastung Heizung	Technischer Aufwand Absaugung

6.2.5 Auswertung

Die thermischen und strömungsmechanischen Simulationen verschiedener stellvertretender Teilbereiche des Systems Bahnhof geben Auskunft über die inneren energetischen Zusammenhänge und den zu erwartenden Komfort in Bahnhöfen. Die Simulation verschiedener Varianten zeigt, wie sich das System gegenüber Strukturänderungen verhält. Da sowohl die Datenmodelle als auch die numerischen Methoden der Simulation starke Vereinfachungen der Wirklichkeit sind, können nur Tendenzen, jedoch keine quantitativ präzisen und zugleich allgemeingültigen Aussagen für alle Bahnhöfe gemacht werden. Die vereinfachten Annahmen in der Modellierung beziehen sich auf folgende Dimensionen:

Dimension	Vereinfachung	Extrapolation
Auswahl Bahnhöfe	Beispielhafte Stellvertreter	Alle Bahnhöfe
Strömungsverhalten	Augenblick, kurze Zeitspanne	Lange Zeiträume
	Willkürliche Randbedingungen	Mögliche Zustände
Temperatur, Energie	Massen- und Energieerhaltung	Räumliche Details
Gesamtsystem	Je Simulation nur ein Aspekt	Zusammenwirkung
Einfluß Personen	Durchschnittliche Anwesenheit	Wechselwirkung

Die verschiedenen Simulationsmethoden ergänzen einander sowohl in ihren Betrachtungsschwerpunkten als auch in ihren vereinfachungsbedingten Lücken. Bis dato ist es nicht möglich, die Verfahren numerisch direkt miteinander kommunizieren zu lassen, sodaß nur die Möglichkeit übrig bleibt, die Simulationen mit unabhängigen Modellen durchzuführen und dann die Ergebnisse analytisch miteinander in Verbindung zu bringen.

Die Modellierung der Nutzer selbst als kritische Größe in einem Bahnhof⁹ fällt in den beiden Simulationsmethoden unterschiedlich aus. Während die Nutzer bei den dynamischen thermisch-

⁹vergleiche Abschnitt 5.1.1

energetischen Simulationen zumindest als Wärmequelle auftreten, ist eine strömungsmechanische Modellierung von Personengruppen äußerst aufwendig und problematisch. Aber auch der Effekt des gegenseitigen Strahlungsaustausches zwischen Personen in einer Gruppe wird bei allen Simulationen vernachlässigt. Die Menschen treten in den Simulationen nur als passive Empfänger der thermischen Zustände auf und tragen selbst nur wenig dazu bei. Lediglich in der Betrachtung der Personenströme in Kapitel 7 sind Menschen ein wichtiger aktiver Bestandteil, da sie gegenseitig als bewegliche Hindernisse auftreten und Türen öffnen.

Die bisher in der Praxis umgesetzten Maßnahmen, das Warten auf Bahnsteigen komfortabler zu gestalten, sind vielfach unzureichend. Die thermischen Bedingungen auf dem Bahnsteig entsprechen dem Außenraumklima. Warteböden wie auf den Bahnsteigen in Köln-Deutz sind häufig zu klein, zu weit von den reservierten Plätzen im Zug entfernt, und oftmals auch dunkel und gefährlich. Große Wartehallen über eine Vielzahl von Bahnsteigen sind sehr kostenintensive Ingenieurbauwerke, deren Glasflächen schwierig zu reinigen sind, und deren Höhe einen natürlichen Auftrieb begünstigt.

Der Bau individueller Glashallen auf jedem Bahnsteig ist sicherlich fragwürdig, da Aufwand und Kosten für die Erstellung und die Instandhaltung sehr groß wären. Des weiteren müßte neben der Funktionalität auch die Personensicherheit jenseits der Fassade untersucht werden. Um die Vor- und Nachteile hinsichtlich der Sicherheit beurteilen zu können, wären Simulationen sinnvoll, die neben Strömungs- auch die Festkörpermechanik umfassen und das Ansaugverhalten durchfahrender Züge auf Personen, Gepäck und Kinderwagen berechnen.

Die Simulationen der Empfangshalle des Darmstädter Hbf leisten einen Beitrag dazu, architektonische Strategien für die Verbesserung des thermischen Komforts der Kunden, Mitarbeiter und gewerbetreibenden Mieter zu überprüfen und zu optimieren. Außerdem kann durch energieeffizienzsteigernde Maßnahmen die Wirtschaftlichkeit im Betrieb des Bahnhofs erhöht werden. Nicht zuletzt sind Strömungssimulationen auch in der Lage, Entrauchungskonzepte für Brandschutznachweise zu liefern. Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter verfolgt.

Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, daß vor allem das Personal im ServicePoint oder andere stationär tätige Personen unter den Luftzugerscheinungen in der Halle zu leiden haben. Da die Empfangshalle keine Sitzbänke hat, ist davon auszugehen, daß Reisende sich in der Halle bewegen oder nur kurze Aufenthalte im Stehen verbringen. Sitzbänke gibt es vor allem auf dem Querbahnsteig und den Bahnsteigen selbst. Dort herrscht zwar eine direkte Sichtbeziehung zu den Zügen, allerdings entspricht das Klima dort praktisch dem Außenraumklima, und der Wartekomfort ist wie in den Abschnitten 6.2.1 und 4.3 beschrieben recht gering.

Die Strömungssimulationen vernachlässigen den aktiven strömungsmechanischen Beitrag der Reisenden in der Empfangshalle sowie die Interaktion mit zum Hallenraum offenen Geschäften. Der Winddruck von außen, der durch offene Türen hindurch Luftströmungen in der Halle erzeugt, wird direkt als Randbedingung in der Türebene angesetzt. Realistischer wäre die Berechnung der Windlast durch eine Strömungssimulation des Vorplatzes unter Berücksichtigung der Fassadenkubatur und des Vordaches. Die Berücksichtigung und Modellierung dieser beiden Details hätte angesichts der heute zur Verfügung stehenden Modellierungswerkzeuge jedoch den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.

In Bezug auf den ServicePoint wäre es ebenfalls interessant, den strömungsmechanischen und thermischen Einfluß der Mitarbeiter zu modellieren und zu simulieren. Als weiterer Schritt wäre eine Integration in das Modell der Empfangshalle aufschlußreich. Für die Simulation eines solch komplexen Modells würden allerdings die mir während der Arbeit zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten nicht ausreichen. Das Modell müßte an anderer Stelle vergrößert werden.

Die Untersuchungen des Reisezentrums haben ebenfalls das Ziel, energetische Einsparungen mit der Gesundheit und dem Behaglichkeitsempfinden der Mitarbeiter in Einklang zu bringen. Die Ausbildung einer thermischen Schleuse ist eine architektonische *LowTech*-Maßnahme, die den Einsatz teurer, energieintensiver und der Gesundheit abträglicher lokaler Heizgeräte und Warmluftgebläse an den Zugängen überflüssig macht. Die Pufferzone findet ihre Anordnung zwischen bestehenden Pfeilern auf der Nordseite des Reisezentrums und nimmt die dort bereits vorhandene Funktion der Informationsbereitstellung auf.

Doch auch das Modell des Reisezentrums nimmt einige Vereinfachungen vor, um den Modellieraufwand in vertretbaren Grenzen zu halten. So wurde auf die DB Lounge und das Bahnhofsmanagement in den Obergeschossen verzichtet, die dynamischen Randbedingungen auf dem Querbahnsteig sowie die strömungsmechanischen Eigenschaften der Angestellten, der Kunden und der Service-Möbel.

7 Funktionalitäts- und Komfortmodell Personenbewegungen in Bahnhöfen

7.1 Motivation

Wie in den einführenden Kapiteln beschrieben, bedeutet die Optimierung der Energieeffizienz von Bahnhöfen, mit einem möglichst geringen Einsatz an Energie¹ das notwendige Maß an Funktionalität und Komfort für Reisende, sonstige Kunden und Personal sicherzustellen.

Ein Bahnhof funktioniert dann, wenn Reisende pünktlich, streßfrei und ohne körperliche Be-
drängnis ihre Züge oder andere Verkehrsmittel erreichen können und dabei einfachen Zugang zu
Informationen und Fahrscheinen haben.

Komfort wird vor allem durch die thermische Situation bestimmt, die sich wiederum aus den Fak-
toren Lufttemperatur, Strahlungstemperatur und -asymmetrien sowie Luftgeschwindigkeit und
-turbulenzgrad zusammensetzt. Des weiteren spielen visuelle und akustische Rahmenbedingungen
eine wichtige Rolle für Behaglichkeit, Informationsgewinnung und Sicherheit.

Insbesondere die Forderungen nach bestmöglicher Beweglichkeit für Reisende durch architekto-
nische Offenheit auf der einen Seite und nach thermischem Komfort und geringen energetischen
Gefällen durch bauliche Geschlossenheit andererseits scheinen einander zu widersprechen. Die
optimale Erfüllung dieser beiden Forderungen durch die Wahl geeigneter Varianten und Kombi-
nationen ist Ziel der im folgenden beschriebenen Modellbildung für numerische Simulationen.

7.2 Zielgrößen

Untersucht werden die Eindrücke und das Befinden von Reisenden bei ihrem Weg durch den Bahn-
hof zu den Zügen oder Ausgängen. Ein weitgehend störungsfreier Zustand wird als *Wohlbefinden*
definiert. Das Wohlbefinden wird durch folgende Randbedingungen primär beeinflusst:²

1. Thermischer Komfort

- Luft- und Strahlungstemperatur
- Luftbewegung
- Bekleidung
- Körperliche Aktivität, Bewegung

¹Verlust an Exergie oder Produktion von Entropie

²Visuelle und akustische Faktoren bleiben bei diesem Modell aus Gründen der Einfachheit unberücksichtigt

2. Streß

- Eile, Hektik, Hetze³
- Dichte, Enge, Stau⁴
- Furcht, Unsicherheit⁵

Neben dem thermischen Zustand ist auch dessen Veränderung von großer Bedeutung, da durch die Anpassung an wechselnde Raumklimata ebenfalls Streß verursacht wird. Der Grundzusammenhang läßt sich wie folgt beschreiben:

$$Y_{i,t} = f_1(K_{X_i,t}, K'_{X_i,t}, S_{i,t}) \quad (7.1)$$

$Y_{i,t}$	Zustand des Wohlbefindens der Person i zum Zeitpunkt t
$K_{X_i,t}$	Termische Komfortbedingung am Ort X der Person i zum Zeitpunkt t
$K'_{X_i,t}$	Veränderung des termischen Zustands für die Person i zum Zeitpunkt t
$S_{i,t}$	Streß der Person i zum Zeitpunkt t

Dabei gilt:

$$K_{X_i,t} = f_2(T_X, L_{X,t}, v_{i,t}, I_{i,t}) \quad (7.2)$$

und

$$S_{i,t} = f_3(H_{i,t}, E_{X_i,t}, F_{i,t}) \quad (7.3)$$

T_{X_i}	Operative Temperatur am Ort X_i ⁶
$L_{X_i,t}$	Luftstrom (Geschwindigkeit und Turbulenz) am Ort X_i zum Zeitpunkt t
$v_{i,t}$	Bewegungsgeschwindigkeit der Person i zum Zeitpunkt t
$I_{i,t}$	Isolationswirkung der Kleidung der Person i zum Zeitpunkt t
$H_{i,t}$	Hektik der Person i zum Zeitpunkt t
$E_{X_i,t}$	Gefühlte Enge am Ort X_i zum Zeitpunkt t
$F_{i,t}$	Furchtempfinden der Person i zum Zeitpunkt t

Qualitative Aussagen über Empfinden des thermischen Komforts können angenähert werden durch den PMV-Index von P. O. Fanger. Dabei ist davon auszugehen, daß Wärme, Kälte, Schwitzen und Zugluft in Bahnhöfen gleichgerichtete Reaktionen hervorrufen wie unter stationären Bedingungen in klimatisierten Räumen. Die in Abschnitt 3.6.4 dargestellten Untersuchungen berücksichtigen keine Bewegung durch verschiedene Klimazonen und daher auch kein thermisches Adaptionsverhalten. Da auch im Rahmen dieser Arbeit keine groß angelegten Erhebungen dieser Art möglich waren, können keine Aussagen über die wahrscheinliche prozentuale Verteilung der Zufriedenen und Unzufriedenen (PPD) gemacht werden.

³Eine Funktion der verbleibenden Zeit bis zur Abfahrt des Zuges und der möglichen Bewegung

⁴körperliche Bewegungsfreiheit, Gedränge, Unterschreitung des Intimitätsradius

⁵Angst vor Unfällen oder Kriminalität

⁶die mögliche Änderung der Temperatur im Verlaufe eines Tages und Jahres wird aufgrund der geringen Größe der betrachteten Zeitfenster vernachlässigt und die örtliche Temperatur als konstant angenommen

Eine eingeschränkte Anwendbarkeit des PPD-Modells liegt aber bei der Bewertung der Komfortbedingungen für das Personal in Bahnhöfen vor. Allerdings werden Bahnhöfe nicht künstlich klimatisiert, und die Bediensteten gehen durch die Wahl ihres Arbeitsplatzes nicht davon aus, ein büroähnliches Klima vorzufinden.⁷ Für das Personal würde auch ein anderes Streßmodell als für die Reisenden zum Tragen kommen, da sie gewöhnlich keine Züge erreichen müssen oder körperlich ein dichtes Gedränge aushalten müssen. Stattdessen hängt ihr Streß neben den thermischen Randbedingungen vor allem von der Anzahl und der Freundlichkeit und Zufriedenheit der Kunden ab, siehe dazu Abschnitt 5.2.

7.3 Modellierung

Das Modell zur Personenbewegung in Bahnhöfen dient der Simulation der wechselseitigen Beeinflussung von Reisenden in ihrer Bewegung durch die verschiedenen Gebäudeteile von Bahnhöfen, sowie der Untersuchung von architektonischen Engpässen wie Türen, Treppen oder Fahrstühlen. Als Eingangsparameter gehen die architektonische Geschlossenheit als Stellhebel zur Vermeidung von Exergieverlusten und Zugluft sowie die Anzahl und Verteilung von Personen ein. Ergebnisgrößen sind die durchschnittliche zeitliche Dauer der Bewegung zwischen Start- und Zielpunkt sowie die Komfort- und Streßeindrücke, die die Personen unterwegs erleiden.

Die Modellstruktur basiert auf den Prinzipien der objektorientierten Programmierung. Dazu wird eine Objektklasse *Person* erzeugt, deren Objekte jeweils einen Reisenden im Bahnhof repräsentiert. Pro Zeiteinheit⁸ wird je eine Bewegungsentscheidung aus Sicht jeder modellierten Person ermittelt und umgesetzt. Im beschriebenen Modell werden innerhalb eines Zeitschrittes nacheinander die Zustände jeder involvierten Person als *ich*⁹ betrachtet, während alle anderen Personen in dem Moment nur anhand ihrer Bewegungen erkennbar sind, aber nicht ihre aktuellen Entscheidungsmuster preisgeben.

Es wird davon ausgegangen, daß jede Person den betreffenden Bahnhof kennt, oder zumindest der Weg offensichtlich ist, der beschritten werden muß, um zum jeweiligen Ziel zu gelangen. Jede Person hat also einen grob umrissenen idealen Weg vor Augen, von dem sie unter Umständen aber abweichen muß, wenn ihr andere Personen in die Quere kommen.

Neben den Personen gibt es Objekte der Klasse *Wand*, zu denen die numerischen Repräsentanten von Wänden als auch von Türen¹⁰ gehören. Eine weitere wichtige Objektklasse ist die *Wahrnehmung*, die zu jeder Person gehört. Ein Objekt der Klasse *Wahrnehmung* funktioniert wie ein eigenständiges kleines Bewegungsmodell, ist jedoch reduziert auf genau jene Personen und Wände, die von der „ich“-Person zu einem bestimmten Zeitpunkt t wahrgenommen werden.

Oberhalb der Klasse der Personen befindet sich die Klasse des Gesamtmodells. In ihr werden Daten gespeichert, die alle Personen betreffen:

⁷Siehe dazu „Expectancy Factor“ von R.T. Hellweg, [99], Abschnitt 3.6.4

⁸Aus numerischen Gründen erfolgt die Simulation in diskreten zeitlichen Schritten von beispielsweise $\delta T = 0,1s$

⁹selbst, englisch: „self“

¹⁰als bewegliche Wände

i	Person mit Index
n_P	Anzahl Personen
t	Zeit [s]
ϵ	Rechengenauigkeit
Baugeometrie	Wände, Türen, Klimazonen
Feld	Ausdehnung des Simulationsgebietes
Routen	Etappen, Zielstrecken

7.3.1 Eigenschaften von Personen

Die Klasse der Personen bzw. Reisenden setzt sich zusammen aus physikalischen, psychologischen, abgeleiteten Größen und Zielgrößen. Zu den *physikalisch meßbaren Veränderlichen* gehören:

$X_{i,t} = (x_{i,t}, y_{i,t})$	[m, m]	Position der i -ten Person zum Zeitpunkt t
$v_{i,t}$	[m/s]	Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t
$v_{i,t}^z$	[m/s]	Optimale Geschwindigkeit für pünktliche Zielerreichung
$a_{i,t}$	[m/s ²]	Beschleunigung zum Zeitpunkt t
$a_{i,t}^z$	[m/s ²]	Notwendige Beschleunigung für Zielgeschwindigkeit $v_{i,t+\delta t}^z$
$a_{i,t}^*$	[m/s ²]	Zulässige Geschwindigkeit aufgrund Kollisionsschutz
$a_{i,t}^o$	[m/s ²]	Optimale Beschleunigung: Minimum aus $a_{i,t}^*$, $a_{i,t}^z$ und a_i^\oplus
$\alpha_{i,t}$	[°]	Bewegungsrichtung
$\delta\alpha_{i,t}$	[°]	Abweichung von der optimalen Zielausrichtung
$\rho_{i,t}$	[m ² /m ²]	Dichte innerhalb des Reaktionsradius
$s_{i,t}$	[m]	Noch mindestens zu laufende Strecke bis zum Ziel
$s_{i,t}^\oplus$	[m]	Bereits gelaufene Strecke ab Startpunkt
$P_{i,t}$	[W/m ²]	Wärmeleistung durch körperlichen Stoffwechsel
$b_{i,t}^\oplus$	[m]	Bremsweg bei Geschwindigkeit $v_{i,t}$

Neben den oben genannten zeitlich veränderlichen Größen besitzt jede Person auch eine Reihe von oberen und unteren Intervallgrenzen der physikalischen Größen, die über den Simulationsverlauf hin konstant sind:

v_i^\oplus	[m/s]	Maximale Geschwindigkeit der i -ten Person
v_i^\ominus	[m/s]	Komfortbedingte Mindestgeschwindigkeit ¹¹
a_i^\oplus	[m/s ²]	Maximale Beschleunigung
a_i^\ominus	[m/s ²]	Betraglich maximale Bremsbeschleunigung, $a_i^\ominus < 0$
r_i^\ominus	[m]	Körperradius ¹²
$\delta\alpha_i^\oplus$	[°]	Maximale Richtungsänderung pro δt bei $v_{i,t} = 0$
$\delta\alpha_i^\ominus$	[°]	Maximale Richtungsänderung pro δt bei $v_{i,t} = v_i^\oplus$
s_i^\ominus	[m]	Minimale Gesamtstrecke zwischen Startpunkt und Zielstrecke
I_i	[CLO]	Wärmedämmung durch Kleidung

Zu den veränderlichen *psychologischen* Eigenschaften gehören folgende Größen:

¹¹Bei Unterschreiten der minimalen Geschwindigkeit setzt eine Person zu Überholmanövern an oder nimmt auch Umwege in Kauf, um schneller ans Ziel zu geraten

¹²Kollisionsradius

$\beta_{i,t}$	[°]	Öffnungswinkel Sichtfeld
$r_{i,t}$	[m]	Radius, Platzbedarf bei Geschwindigkeit $v_{i,t}$
$r_{i,t}^r$	[m]	Reaktionsradius, bezogen auf Hindernisse und Dichteempfinden
$\eta_{i,t}$	[%]	Eile, Verhältnis zwischen benötigter und zur Verfügung stehender Restzeit
$H_{i,t}$	[%]	Hektik, Verhältnis zwischen Eile zum Zeitpunkt t und unerträglicher Eile
$E_{i,t}$	[%]	Enge, Verhältnis zwischen Dichte zum Zeitpunkt t und maximaler Dichte
$\Psi_{i,t}$	[ja/nein]	Panik tritt ein, wenn entweder Hektik oder Enge Grenzwert überschreiten

Folgende psychologische Eigenschaften sind im Verlauf einer Simulation konstant:

D_i	[%]	Dominanz ¹³
r_i^i	[m]	Intimitätsradius der i -ten Person
r_i^\oplus	[m]	Wahrnehmungsradius
β^\oplus	[°]	Maximaler Öffnungswinkel Sichtfeld bei $v_{i,t} = 0$
β^\ominus	[°]	Maximaler Öffnungswinkel Sichtfeld bei $v_{i,t} = v_i^\oplus$
ρ_i^\oplus	[m ² /m ²]	Erträgliche Personendichte, Grenzwert für Panikreaktion
t_i^\oplus	[s]	Zeitpunkt der Abfahrt des von i anvisierten Zuges
t_i^\ominus	[s]	Zeitpunkt der Abfahrt t_i^\oplus abzüglich eines zeitlichen Puffers Δt_i^\ominus
Partner	[]	Person, die als bewegliches Ziel angesehen wird ¹⁴

Folgende Größen sind abgeleitet, d.h. sie werden aus den Zuständen der Personen berechnet:

$\Delta\alpha_{i,t}$	[°/s]	Maximale Richtungsänderung pro Zeiteinheit δt bei Geschwindigkeit $v_{i,t}$
$W_{i,t}$	[%m/s]	Wirkung
$W_{X_{i,t}}^\ominus$	[%m/s]	Gegenwirkung
$W_{X_{i,t}}^\oplus$	[%m/s]	Mitwirkung
$\Delta t_{i,t}$	[s]	Restzeit
$d_{i,j,t}$	[m]	Abstand zwischen <i>Ich</i> -person i und Fremdperson j zum Zeitpunkt t
$l_{i,j,t}$	[m]	LotAbstand von j zur Bewegungsgeraden von i zum Zeitpunkt t

7.3.2 Berechnung abgeleiteter Größen

Bremsweg

Der Bremsweg ist die Strecke vor einer Person, die in jedem Fall frei von Hindernissen bleiben muß, sodaß die betreffende Person jederzeit aus eigener Kraft Kollisionen vermeiden kann. Der Bremsweg $b_{i,t}$ zum Zeitpunkt t ist nach [16] und [17] abhängig von der Momentangeschwindigkeit $v_{i,t}$ und der betraglich maximalen Bremsbeschleunigung a_i^\ominus der Person i , siehe Gleichung 7.4.

$$b_{i,t} = r_i^\ominus - \frac{v_{i,t}^2}{2a_i^\ominus} \quad (7.4)$$

¹³Durchsetzungsvermögen, Sturheit, Wahrscheinlichkeit, nicht für andere Personen zur Seite zu treten

¹⁴z.B. Elternteil, oder wechselseitig bei Pärchen

Weg- und Zeitplanung

Die Geschwindigkeit einer Person wird vor allem von Sicherheitsaspekten, dem Wunsch nach Pünktlichkeit und dem persönlichen Bewegungskomfort beeinflusst. Während das Kriterium Sicherheit als Schutz vor Kollisionen lediglich eine Obergrenze für Geschwindigkeiten darstellt¹⁵, liefert das Kriterium des pünktlichen Erreichens eines Zieles¹⁶ eine Geschwindigkeitsuntergrenze. Der individuelle Bewegungskomfort bedeutet sowohl eine Ober- als auch Untergrenze.

Die restliche Zeit $\Delta t_{i,t}$ bis zum geplanten Erreichen des Ziels ist die ursprüngliche Zeit bis zur Abfahrt des Zuges t_i^\oplus abzüglich des eingeplanten zeitlichen Puffers t_i^\ominus und der bereits vergangenen Zeit t :

$$\Delta t_{i,t} = t_i^\ominus - t = t_i^\oplus - t_i^\ominus - t \quad (7.5)$$

Auf die Darstellung der Berechnung der mindestens noch zu laufenden Strecke bis zum Ziel $s_{i,t}$ wird an dieser Stelle aus Platzgründen verzichtet. Die optimale Zielgeschwindigkeit $v_{i,t}^\ominus$ wird wie folgt berechnet:

$$v_{i,t}^\ominus = \min \left(f_i \frac{s_{i,t}}{\Delta t_{i,t} (\cos \delta\alpha + 1)}, v_i^\oplus \right), \quad \Delta t_{i,t} \geq \epsilon > 0, \quad \cos \delta\alpha > -1, \quad 0 \leq f_i \leq 1, 2 \quad (7.6)$$

f_i ist ein Faktor, mit dem die Person i ihre notwendige Zielgeschwindigkeit übersteuert, um sich einen zusätzlichen zeitlichen Puffer herauszulaufen. Die Division durch den Cosinus der Winkelabweichung vom Ziel $\delta\alpha$ stellt sicher, daß bei Umwegen automatisch eine höhere Geschwindigkeit gewählt wird.

Die optimale Zielbeschleunigung a_i^\ominus für den nächsten Zeitschritt δt wird zunächst wie folgt berechnet:

$$a_{i,t}^\ominus = \min \left(\frac{v_{i,t}^\ominus}{\delta t}, a_i^\oplus \right) \quad (7.7)$$

Die Zielbeschleunigung $a_{i,t}^\ominus$ wird jedoch nicht automatisch umgesetzt, sondern vorher durch die maximal zulässige Beschleunigung $a_{i,t}^*$ nach oben begrenzt¹⁷. Außerdem bremsen Personen rechtzeitig ab, wenn Sie ein Etappenziel mit einer anschließenden Pause¹⁸ erreichen.

Bewegungsrichtung, Blickwinkel

Zwei Winkelgruppen spielen im Bewegungsmodell eine wichtige Rolle: Jene, die mit der Bewegungsausrichtung und deren Veränderung zu tun haben, werden mit α bezeichnet, und solche,

¹⁵siehe hierzu Abschnitt 7.3.10

¹⁶wie beispielsweise der Zustieg in einen Zug, bevor dieser Abfährt

¹⁷siehe hierzu Abschnitt 7.3.10

¹⁸z.B. Besuch des ServicePoints, Betrachten eines Fahrplans etc...

die die Öffnungsweite des Blickfeldes beschreiben, mit β . Für beide Winkel spielt es eine Rolle, wie schnell sich eine Person i relativ zu ihrer maximalen Geschwindigkeit bewegt:

$$\gamma v_{i,t} = \frac{v_{i,t}}{v_i^\oplus} \quad (7.8)$$

$$\delta \alpha_{i,t} = \delta \alpha_i^\oplus (1 - 0,9 \gamma v_{i,t}) \quad (7.9)$$

$$\beta_{i,t} = \beta_i^\oplus (1 - \gamma v_{i,t}) + \beta_i^\ominus \gamma v_{i,t} \quad (7.10)$$

$\gamma v_{i,t}$ ist der Anteil der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t an der maximalen Geschwindigkeit. Steht die Person, so kann sie ihre maximale Drehfähigkeit voll ausschöpfen. Je mehr sie bis hin zur maximalen Geschwindigkeit beschleunigt, desto geringer wird die mögliche Richtungsänderung pro Zeit $\Delta \alpha_{i,t}$, und umso schmaler wird der Sichtwinkel $\beta_{i,t}$.

Eine neue Bewegungsrichtung $\alpha_{i,t+\delta t}$ wird in der Regel so berechnet, daß die Person i auf kürzestem Weg ihrem nächsten Etappenziel entgegenläuft. Ausnahmen kommen aber dann ins Spiel, wenn entweder ein Ausweichmanöver notwendig wird¹⁹, oder eine Person anstelle eines Etappenziel eine Zielperson ansteuert²⁰.

Streß: Enge und Hektik

Neben dem thermischen Diskomfort sollen in diesem Simulationsmodell vor allem Enge und Hektik als Verursacher von Streß untersucht werden. Die Enge ist in diesem Modell sogar ein Kriterium dafür, daß Personen Umwege laufen, während sich die Hektik nur indirekt auf die Wahl des Weges auswirkt. Thermischer Komfort wird in dieser Simulation nur gemessen und wird nicht als Ursache für Bewegungsentscheidungen²¹ herangezogen.

Der Wert für die Hektik $H_{i,t}$ ist das Verhältnis der Eile $\eta_{i,t}$ der Person i zum Zeitpunkt t zur maximal erträglichen Eile η_i^\oplus . Analog dazu ist die Enge $E_{i,t}$ das Verhältnis der Dichte $\rho_{i,t}$ in der Umgebung der Person i zum Zeitpunkt t zur maximal erträglichen Dichte ρ_i^\oplus :

$$H_{i,t} = \frac{\eta_{i,t}}{\eta_i^\oplus} \quad (7.11)$$

$$E_{i,t} = \frac{\rho_{i,t}}{\rho_i^\oplus} \quad (7.12)$$

Panik $\Psi_{i,t}$ tritt genau dann ein, wenn entweder $H_{i,t} > 1$, $E_{i,t} > 1$ oder eine Kollision vorliegt²².

¹⁹Siehe Abschnitt 7.3.8

²⁰Beispielsweise Kinder, die nicht auf eigene Faust durch den Bahnhof laufen, sondern ihre Eltern als bewegtes Ziel ansehen.

²¹Bewegungsentscheidungen aufgrund von thermischen Randbedingungen ließen sich natürlich auch implementieren, in dem für diese Arbeit gewählten Modell wurde allerdings darauf verzichtet

²²In anderen Zusammenhängen könnte auch der Fall modelliert werden, daß Panik aufgrund von Feuer oder eines Unfalls ausbricht. Das ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die Eile $\eta_{i,t}$ wird dabei wie folgt berechnet:

$$\eta_{i,t} = \eta_i^\ominus + \frac{2s_{i,t}}{(v_i^\oplus + v_{i,t})\Delta t_{i,i}} \quad (7.13)$$

Dabei ist η_i^\ominus das Eilegefühl, welches die Person i bereits beim Betreten des Bahnhofs verspürt.

Die Dichte ρ_i in der Umgebung einer Person i an deren momentanem Ort X zum Zeitpunkt t ist ein Quotient, bei dem die Summe der durch andere Objekte belegte Flächen durch die zur Verfügung stehende Umgebungsfläche geteilt wird. Im Zähler werden die Flächen der Personen im Reaktionsradius von i , gewichtet nach ihrem Abstand zu X_i , sowie Flächen, die durch Wandabschnitte blockiert werden, addiert. Im Nenner befindet sich die Differenz aus der durch den Radius r_i^r beschriebenen Kreisfläche und der Eigenfläche r_i^\ominus der Person i :

$$\rho_{X_i,t} = \frac{F_p + F_w}{F_i} = \frac{\sum_{p \in R_i} \pi r_p^{\ominus 2} g_{X_i,p} + \sum_{w \in R_i} 0,3s_w^2}{\pi(r_i^{r2} - r_i^{\ominus 2})} = \frac{\sum_p \pi r_p^{\ominus 2} \frac{1+r_i^i+r_p^\ominus-d_{i,p}}{r_i^r} + \sum_w 0,3s_w^2}{\pi(r_i^{r2} - r_i^{\ominus 2})} \quad (7.14)$$

F_p	$[m^2]$	Summe aller Körperflächen der anderen Personen im Reaktionskreis
F_w	$[m^2]$	Summe aller durch Wandabschnitte unzugänglichen Flächen
F_i	$[m^2]$	Größe des Reaktionskreises R_i abzüglich der Körperfläche von i
R_i		Reaktionskreis der Person i mit Radius $r_{i,t}^r$
$\sum_{p \in R_i}$		Summe über alle Personen p innerhalb des Reaktionskreises R_i
$\sum_{w \in R_i}$		Summe über alle Wandabschnitte innerhalb des Reaktionskreises i
$g_{X_i,p}$		Gewichtungsfunktion über Abstand und Radien der Personen i und p
s_w	$[m]$	Länge des Wandabschnittes, der in den Reaktionskreis R_i hineinragt
r_i^r	$[m]$	Reaktionsradius der Person i
r_i^i	$[m]$	Intimitätsradius der Person i
r_i^\ominus	$[m]$	Körperradius der Person i
r_p^\ominus	$[m]$	Körperradius der Person p

Während die Projektionsflächen F_p gewichtet mit dem Faktor $g_{X_i,p}$ relativ unverzerrt in die Berechnung der Dichte eingehen, handelt es sich bei den Flächen der Wände um eine Approximation, die für alle drei geometrischen Konstellationen gleichermaßen gute Werte liefert:

1. Die Wand schneidet den Reaktionskreis zweimal, die entstehende Sekante schneidet ein Segment aus dem Reaktionskreis
2. Die Wand schneidet den Reaktionskreis einmal, der Wandabschnitt endet im Reaktionskreis
3. Die Wand liegt komplett innerhalb des Reaktionskreises

Abbildung 7.1 veranschaulicht die geometrische Konstellation und die Approximation der durch Wände blockierten Flächen. Die von den Wänden tatsächlich blockierten Flächen sind grau dargestellt, die approximierten Flächen gelb.²³

²³Die blockierte Fläche von Wänden, welche den Reaktionskreis zweimal schneiden, könnte selbstverständlich

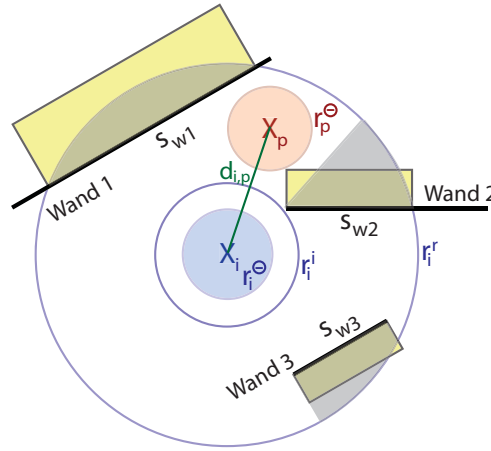


Abbildung 7.1: Berechnung der Dichte in der Umgebung einer Person

Wirkungen

Wirkungen sind ein wichtiger Bestandteil dieses Konzeptes für Personenbewegungen. Jede Person entfaltet eine Wirkung, die eine Funktion ihrer momentanen Geschwindigkeit $v_{i,t}$, ihrer Eile $\eta_{i,t}$ und ihres Durchsetzungsvermögens D_i ist:

$$W_{i,t} = (v_{i,t} + \epsilon)\eta_{i,t}e^{D_i}, \quad \epsilon > 0 \quad (7.15)$$

Dabei ist $W_{i,t} > 0$ als Länge eines Vektors anzusehen, der von dem Ort $X_{i,t}$ der Person i ausgeht. Bildhaft kann man sich die Wirkungen in einem Bewegungsmodell vorstellen wie Trajektorien von Kräften in Bauteilen, oder wie die Scharen von Vektoren in Darstellungen von gewöhnlichen, linearen Differentialgleichungen in der Ebene. Jede Person stellt dabei nicht nur eine Wirkung zur Verfügung, sondern spürt auch die Wirkungen anderer Personen innerhalb einer gewissen Umgebung. Die Wirkungen der übrigen Personen können als unterstützend²⁴, neutral oder als störend²⁵ empfunden werden.

Die Gegenwirkung einer Person i ist die Summe an Wirkungen all jener Personen $j \neq i$, die sich im Blickfeld und innerhalb des Wahrnehmungsradius von i befinden, und deren Wirkung zumindest teilweise der Wirkung von i entgegengesetzt ist:

$$W_{X_i,t}^\ominus = \sum_{p \in R_i} \frac{W_{p,t} \cos(\alpha_p - \alpha_i)}{d_{i,p,t}}, \quad p \neq i, \quad X_p \in r_i^\oplus, \quad |\alpha_p - \alpha_i| > 90^\circ \quad (7.16)$$

auch genau als Kreissegment berechnet werden. Allerdings brächte dies zwei Nachteile: Zum einen würde das Engegefühl infolge von Wänden in unmittelbarer Nähe einer Person sehr dominant, zum anderen würde das Verfahren zur Bestimmung der Dichte numerisch unstetig. In gewissen geometrischen Konstellationen würde die Berechnung zwischen Approximation und genauer Berechnung springen und die simulierten Personen zu unnatürlichen, ruckartigen Bewegungen verleiten.

²⁴ „Mitwirkung“

²⁵ „Querwirkung“ und „Gegenwirkung“

Zur Bestimmung der Gegenwirkung werden die Wirkungen der gegenläufigen Personen vektoriell addiert, wobei die Einzelvektoren jeweils um den Abstand zwischen der Person i und den Personen p gestaucht werden.

Die unterstützende Wirkung entsteht analog zur Gegenwirkung, allerdings durch Personen, die sich zumindest teilweise in dieselbe Richtung bewegen wie i :

$$W_{X_i,t}^{\oplus} = \sum_{p \in R_i} \frac{W_{j,t} \cos(\alpha_j - \alpha_i)}{d_{i,p,t}}, \quad p \neq i, \quad X_p \in r_i^{\oplus}, \quad |\alpha_p - \alpha_i| < 90^\circ \quad (7.17)$$

Wirkungen spielen in dreierlei Hinsicht eine wichtige Rolle:

1. Zur Früherkennung von gruppendynamischen Bewegungen mit dem Ziel, gegenläufigen Personen auszuweichen und sich gleichläufigen Gruppen anzuschließen
2. Zur Entscheidung, welche Personen bei einer unmittelbaren Konfrontation weiterlaufen dürfen und welche stoppen müssen, siehe dazu den Abschnitt 7.3.7 über *Wirkungsbilanzen*.
3. Zur Bestimmung der Reihenfolge, in der Personen ihre Bewegungsentscheidung fällen und umsetzen dürfen²⁶

7.3.3 Wahrnehmung

Die Wahrnehmung einer Person hat dieselben Eigenschaften wie ein komplettes Bewegungsmodell, besitzt aber hinsichtlich der Auswahl von Personen und Wänden eine Filterfunktion. In die Wahrnehmung einer Person i werden nur die Hindernisse aufgenommen, die gesehen oder gespürt werden. Außerdem werden auf Ebene einer Wahrnehmung Dichte und Wirkungen berechnet, Kollisionen geprüft sowie die jeweils nächste Person p_n identifiziert. Wahrnehmungen können auch zukünftige Situationen darstellen, der Wert t_i einer Wahrnehmung kann also größer sein als der aktuelle Wert t des gesamten Bewegungsmodells. Auf eine detaillierte mathematische Beschreibung aller Methoden und Eigenschaften der Klasse *Wahrnehmung* wird aus Platzgründen an dieser Stelle verzichtet.

7.3.4 Klone

Klone sind neben den Wirkungen ein weiteres wichtiges Konzept der Bewegungssimulation. Sie dienen dazu, Situationen in naher Zukunft $t + \gamma \delta t$ abzutasten und somit den entsendenden Personen Informationen über erfolgversprechende Wege zu liefern. Der Hauptgrund, weshalb die Entscheidungen nicht ausschließlich mit Hilfe von Wirkungen getroffen werden, liegt darin, daß es manchmal von Vorteil sein kann, kurzfristig einen Umweg zu beschreiten, wenn sich nach wenigen Schritten dafür eine umso bessere Alternative bietet. Menschen in der Realität erkennen solche Varianten intuitiv, simulierte Personen ohne Zukunft abtastende Klone würden nur den Augenblick optimieren, jedoch nicht die mit großer Sicherheit vorhersehbare Zukunft berücksichtigen.

²⁶ siehe Abschnitt 7.3.6

Klone haben im Grunde dieselben Eigenschaften wie Personen. Ihr Bewegungsmodell ist die Wahrnehmung der sie aussendenden Person. Klone können wiederum weitere Klone aussenden, sodaß sich mit größerer Rechentiefe eine baumartige Struktur ergibt. Da sich Klone in der Zukunft²⁷ bewegen, die 'abgetasteten' anderen Personen jedoch in der Gegenwart bleiben, besitzen diese aus Sicht und in der Zeit der Klone keine eindeutige Position und Geschwindigkeit, sondern Intervalle von *möglichen* Zuständen. Der Algorithmus des Ab tastens durch Klone wird in Abschnitt 7.3.6 näher beschrieben.

7.3.5 Weitere Objekte

Etappen, Wege, Ziele

Im Bewegungsmodell Bahnhof besteht ein Weg aus verschiedenen Etappen, da Reisende auf ihrer Route zum Zug mehrere Gebäudezonen durchqueren und ggf. sogar noch Fahrscheine oder Konsumgüter kaufen oder Informationen einholen. Ein Etappenziel sollte vom jeweiligen Etappenstartpunkt aus sichtbar sein. Zielorte sind niemals Punkte, sondern Strecken. Eine Person versucht grundsätzlich, den nächstgelegenen Punkt einer Zielstrecke anzusteuern. Sobald ein Etappenziel erreicht ist, nimmt die jeweilige Person Kurs auf das nächste Ziel. Erreicht sie ihr Endziel, drosselt sie ihre Geschwindigkeit und verläßt das Modell.

Die Zielstrecke der k -ten Etappe von i hat die Form $\left(\begin{pmatrix} x_{i,k,1} \\ y_{i,k,1} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_{i,k,2} \\ y_{i,k,2} \end{pmatrix} \right)$.

Wände

Wände bestehen in diesem Modell lediglich aus einer Strecke. Sowohl Personen als auch Klonen ist es nicht möglich, eine Wand zu durchqueren oder zu betreten. Wände stellen allerdings keine klimatische Grenze dar. Diese Funktion übernehmen die Klimazonen.

Türen

Türen sind eine Spezialform von Wänden: Sie besitzen drei Strecken sowie eine Zahl $0 \leq \gamma \leq 1$, welche den Öffnungsgrad der Tür beschreibt. Die erste der drei Strecken beschreibt den geschlossenen Zustand bei $\gamma = 0$, die zweite den vollständig geöffneten Zustand bei $\gamma = 1$. Die dritte Strecke ist die tatsächliche Position der Tür zum Zeitpunkt t , eine Funktion aus γ und den ersten beiden Strecken.

Eine Tür besitzt auch eine Geschwindigkeit $v_{T,t}$, gemessen in [%/s]. Sie gibt an, um wieviel % sich γ pro Zeiteinheit δt verändern kann.

Zuletzt besitzt jede Tür polygonale Sensorfelder. Wird ein Sensorfeld einer Tür von mindestens einer Person betreten, so erhöht sich γ um $v_{T,t}$ bis maximal 1. Wird keines der Sensorfelder auch nur von einer einzigen Person betreten, so sinkt γ pro δt um $v_{T,t}$ bis 0.

²⁷In der Regel allerdings weniger als $t + 1$ Sekunde

Klimazonen

Klimazonen sind Polygone, in denen einheitliche Werte für Lufttemperatur, Wärmestrahlung, Luftgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte bestehen.

7.3.6 Algorithmus zur Bewegungssimulation

Die Simulation der Personenbewegung erfolgt iterativ, das heißt für jeden diskreten Zeitschritt δt werden für sämtliche Personen folgende Schritte durchgeführt:

1. Blick, Umgebung erfassen²⁸
2. Berechnung der eigenen veränderlichen Eigenschaften²⁹
3. Berechnung des Einflusses der Wirkungen der übrigen Personen in der Umgebung³⁰
4. Berechnung einer Bewegungsentscheidung und Umsetzung der Bewegung
5. Berechnung der thermischen Komfortwerte PMV und δPMV
6. Berechnung der Bewegung von Türen
7. Graphische Darstellung und Monitoring der berechneten Werte

Die Berechnung der Bewegungsentscheidung und die Umsetzung der Bewegung (4.) sollen im Folgenden näher erläutert werden. Grundsätzlich sind drei verschiedene Verfahren wählbar, die sich in der Reihenfolge der Durchführung der beiden Schritte *Entscheidung* und *Bewegung* unterscheiden:

Vollbremsung

In diesem Verfahren treffen alle Personen zunächst unabhängig voneinander eine Bewegungsentscheidung. Danach werden die Personen in absteigender Reihenfolge nach ihrer Wirkung sortiert. Die Person mit der höchsten Wirkung kann auf jeden Fall problemlos ihre Entscheidung in eine Bewegung umsetzen. Die darauf folgenden Personen müssen bei Ihrer Bewegung jedoch darauf achten, keine Kollisionen mit den bereits in diesem Iterationsschritt bewegten Personen zu verursachen. Kann eine Entscheidung aufgrund der Bewegung einer Person mit höherer Wirkung nicht mehr umgesetzt werden, leitet die betroffene Person eine Vollbremsung ein.

Dieses Verfahren hat sich als sehr stabil und robust erwiesen und wird daher in den im Abschnitt 7.5 dargestellten Simulationen verwendet.

²⁸dieser Schritt entspricht der Erzeugung eines neuen Objektes der Klasse Wahrnehmung, siehe Abschnitt 7.3.3

²⁹siehe Abschnitt 7.3.1

³⁰Sowohl Mit- als auch Gegenwirkungen

Ausweichen

In diesem Verfahren müssen die in ihrer Wirkung unterlegenen Personen keine Vollbremsung einleiten, sondern können sich im letzten Augenblick für eine alternative Bewegung entscheiden. Praktisch wird der Algorithmus so umgesetzt, daß alle Personen bereits vor der Bewegungsentscheidung gemäß ihrer Wirkung sortiert werden, und ihre Entscheidung jeweils sofort umsetzen, bevor die nächste Person an der Reihe ist.

Gleichzeitigkeit

Im dritten Verfahren gibt es keine Bevorzugung aufgrund von Wirkungen, und daher auch keine Sortierung. Alle Personen treffen unabhängig voneinander ihre Bewegungsentscheidung. Danach werden alle Entscheidung zwar nacheinander, in ihrer Logik aber gleichzeitig umgesetzt. Sobald sich die Bewegungsentscheidungen von zwei oder mehr Personen gegenseitig ausschließen, müssen alle Beteiligten eine Vollbremsung ausführen.

7.3.7 Bewegungsentscheidungen

Bei jedem Iterationsschritt muß für jede simulierte Person entschieden werden, wie sie sich am besten bewegt. Die Hierarchie der Fallentscheidungen ist in Abbildung 7.2 dargestellt. Ist für eine Person kein Hindernis erkennbar, so bewegt sie sich mit einer angemessenen Geschwindigkeit direkt auf die Ziellinie der aktuellen Etappe zu.

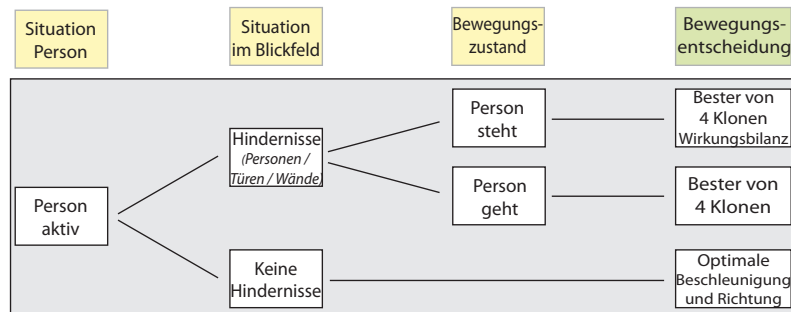


Abbildung 7.2: Bewegungsvarianten in Abhängigkeit der bisherigen Situation einer Person

Abtasten zukünftiger Situationen mit Klonen

Folgende Ereignisse führen allerdings dazu, daß für eine Person iterativ und rekursiv verschiedene Bewegungsmöglichkeiten mit Hilfe von *Klonen* testweise durchlaufen und bewertet werden:

- Person bremste im letzten Iterationsschritt
- Person läuft langsamer als es ihre individuelle Mindestgeschwindigkeit zuläßt
- Person läuft nicht die optimale, für die Zielerreichung angemessene Geschwindigkeit

Zeit	Anzahl
t	1 Person
$t + 0,1$	4 Klone
$t + 0,4$	16 Klone
$t + 0,9$	64 Klone
$t + 1,6$	256 Klone
Σ	340 Klone

Tabelle 7.1: Anzahl Klone einer Person bei einer Rekursionstiefe von 4

- Person ist nicht auf das Ziel ausgerichtet
- Person erblickt ein Hindernis
- Person erblickt Ziel

Eine Person, die eine Entscheidung treffen muß, schickt vier virtuelle Klone aus, die sich hinsichtlich Beschleunigung und Richtungsänderung unterscheiden. Mit anderen Worten: Die Person probiert im Geiste vier alternative Bewegungsentscheidungen für die Zeiteinheit δt aus. Die vier Klone bewerten die von ihnen vorgefundene Situation wie in Abschnitt 7.3.11 beschrieben und melden ihr Ergebnis an die Person zurück. Die Person wird nun die Bewegung des Klons mit der besten Bewertung vollführen.

Klone können ihrerseits jeweils vier Klone aussenden, sodaß eine Person mit *Rekursionstiefe* 2 insgesamt 20 Klone aussendet, davon vier direkt in die Zeit $t + \delta t$, und sechzehn indirekt in die Zeit $t + 2\delta t + \delta\delta t$. Die für diese Arbeit modellierten Personen verwenden eine Rekursionstiefe von 4, ein δt von 0,1s und ein $\delta\delta t$ von 0,2s. Somit ergibt sich die folgende maximale Anzahl Klone in der jeweiligen Zeit:

Trifft ein Klon auf eine unmögliche Situation, weil er beispielsweise mit einer Wand oder einer anderen Person kollidiert, wird das rekursive Abtasten an dieser Stelle abgebrochen. Dieser Klon erhält die schlechtestmögliche Bewertung von 0³¹.

Alternative Bewegungsmöglichkeiten

Muß eine Entscheidung mit Hilfe von Klonen getroffen werden, so richten sich die unterschiedlichen Bewegungsmöglichkeiten danach, ob die Person bereits eine Vorwärtsbewegung vollzieht ($v_{i,t} > 0$) oder steht bzw. einen Seit- oder Rückschritt macht ($v_{i,t} = 0$).

Falls die Person im Moment der Entscheidung bereits in Bewegung ist, stehen folgende alternative Bewegungsmöglichkeiten zur Verfügung:

1. Nach rechts drehen und optimal beschleunigen, d.h. kreuzen oder parallel ziehen
2. Nach links drehen und optimal beschleunigen, d.h. kreuzen oder parallel ziehen
3. Vollbremsung und keine Richtungsänderung
4. Maximal zulässige Beschleunigung (positiv oder negativ) ohne Richtungsänderung

³¹Vergleiche Abschnitt 7.3.11

Bilanz	Individuell	Gruppe
3	$W_i > W_p$	$W_i^{\oplus} > W_i^{\ominus}$
2	$W_i > W_p$	$W_i^{\oplus} < W_i^{\ominus}$
	oder	
2	$W_i < W_p$	$W_i^{\oplus} > W_i^{\ominus}$
1	$W_i < W_p$	$W_i^{\oplus} < W_i^{\ominus}$

Tabelle 7.2: Wirkungsbilanz in Abhängigkeit der Gruppen- und individuellen Wirkungen

Wirkungsbilanz

Steht eine Person, so hängt die Auswahl der nächsten Bewegungsmöglichkeiten davon ab, wie groß ihre *Wirkungsbilanz* gegenüber der Personen ist, die sie als Hindernis empfindet. Siehe dazu Abbildung 7.3.

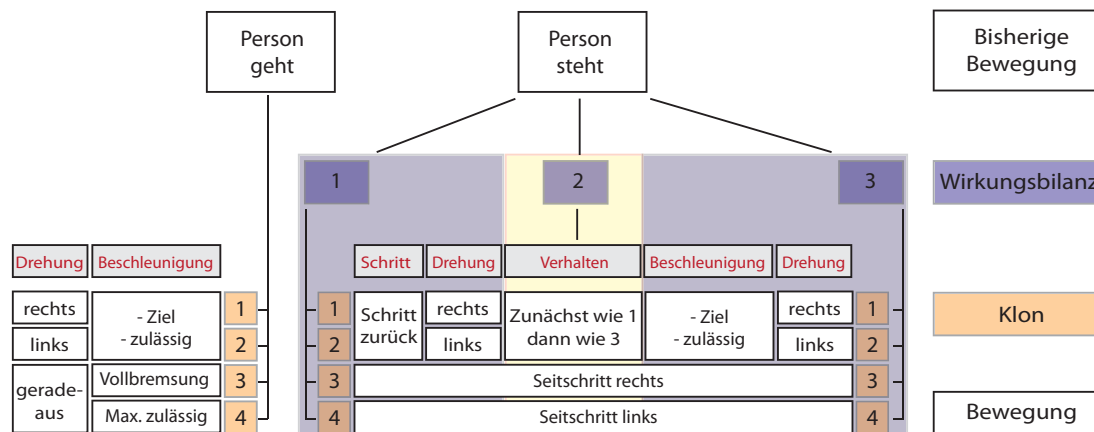


Abbildung 7.3: Wirkungsbilanz und die daraus resultierenden Bewegungsmöglichkeiten

Zur Bestimmung der Wirkungsbilanz werden sowohl die Wirkungen der beiden Gruppen verglichen³² als auch die individuellen Wirkungen der Person i und der nächsten gegenlaufenden Person p_n , sofern sich diese innerhalb des Reaktionsradius von i befindet.

Die Klone 3 und 4 machen immer einen Seitschritt, unabhängig von der Wirkungsbilanz³³.

Klone mit einer Wirkungsbilanz von 1 sind sowohl individuell als auch als Gruppe in ihrer Wirkung dem Gegenverkehr unterlegen. Daher weichen die Klone 1 und 2 zurück, ehe sie durch eine Drehung versuchen, einen freien Weg in einer anderen Richtung zu finden.

Klone mit einer Wirkungsbilanz von 3 sind sowohl individuell als auch als Gruppe in ihrer Wirkung dem Gegenverkehr überlegen. Daher drehen sich die Klone 1 und 2 und versuchen dann direkt zu beschleunigen.

³²mitlaufend: „Mitwirkung“ und gegenlaufend: „Gegenwirkung“

³³Eine Ausnahme bilden die Klone von Rollstuhlfahrern, die keinen Schritt zur Seite machen können

Klone mit einer Wirkungsbilanz von 2 sind als Gruppe über- und individuell unterlegen oder umgekehrt. Sie vollführen zunächst eine defensive Bewegung wie Klone der Wirkungsbilanz 1, um dann aber ab dem übernächsten Zeitschritt wie Klone der Wirkungsbilanz 3 zu agieren.

Treffen zwei Klone mit der gleichen Wirkungsbilanz aufeinander, entscheidet der Zufall, welcher der Klone Vorrang genießt.

Bewegung der Klone

In jeder Iterationsstufe werden vier Klone der entsendenden Person erzeugt. Gemäß Abbildung 7.3 drehen die Klone oder vollführen einen Schritt zurück oder zur Seite. Die optimale Beschleunigung wird zunächst nur berechnet und beauftragt. Danach werden für die Klone alle in Abschnitt 7.3.2 beschriebenen Berechnungen durchgeführt. Jene Klone, die eine Beschleunigung durchführen sollen, berechnen nun mit Hilfe der Grundgleichungen der Kinematik die aus der Beschleunigung resultierende Geschwindigkeit, welche durch den Wert v_i^{\oplus} nach oben begrenzt wird. Die Änderung der Position wird nun aus der soeben berechneten Geschwindigkeit und dem diskreten Zeitschritt $\delta t + (n - 1)\delta\delta t$, wobei n die aktuelle Rekursionstiefe ist. Die neue Beschleunigung, Geschwindigkeit, Position und Ausrichtung werden nun anhand der Kriterien aus Abschnitt 7.3.11 bewertet, wobei sowohl eine Kollision als auch eine Pendelbewegung die schlechtestmögliche Bewertung 0 erhalten³⁴. Die vier Einzelbewertungen werden nun verglichen. Der Klon mit der höchsten Bewertung wird als Bewegungsempfehlung an die entsendende Person oder den entsendenden Klon zurückgegeben, die anderen drei Klone werden gelöscht. Haben zwei oder mehr Klone die gleiche beste Bewertung, entscheidet der Zufall, welche der beiden Empfehlungen die entsendende Person annimmt und umsetzt.

Bewegung der Personen

Eine Person i führt ihre Bewegung dadurch aus, daß sie die Werte *Beschleunigung*, *Geschwindigkeit*, *Position* und *Ausrichtung* ihres besten Klons zum Zeitpunkt t übernimmt. Sollte dieser Klon eine Kollision verursachen, da beispielsweise andere Personen mit einer größeren Wirkung bereits eine Bewegung ausführen durften, die den Klonen der Person i noch nicht bekannt war, so findet eine Notbremsung statt. Die Person i verbleibt auf ihrer alten Person, die Zählvariable für Kollisionen wird um 1 angehoben.

7.3.8 Ausweichen

Die Personen im Bewegungsmodell bewegen sich von ihrer Startposition aus so direkt wie möglich und so schnell wie nötig auf ihre jeweilige Ziellinie zu. Auf diesem Weg können Sie aber aufgrund von Hindernissen gezwungen werden, gewisse Umwege im Kauf zu nehmen. Innerhalb des hier besprochenen Modells gibt es drei verschiedene Arten von Hindernissen:

1. Andere Personen

³⁴Ein Aufprall bzw. eine Kollision liegt dann vor, wenn der Abstand zwischen zwei Personen oder der Abstand zwischen einer Person und einer Wandstrecke geringer ist als der Körperradius einer der betroffenen Personen

2. Wände
3. Türen

Türen sind in diesem Modell nichts anderes als eine besondere Form von Wänden, die bei Betreten bestimmter Bereiche durch Personen ihre Lage von einem Zustand A in einen Zustand B und umgekehrt verändern können. Wände und Personen unterscheiden sich dadurch, daß Personen in der modellhaft zweidimensionalen Projektion eine kreisförmige Ausdehnung haben und sich bewegen können, während Wände durch Strecken repräsentiert werden und sich nicht bewegen können. Im Folgenden wird das Simulationsverfahren beschrieben, welches Ausweichvorgänge von Personen gegenüber anderen Personen berechnet und bewertet.

Reaktion auf andere Personen

Der Algorithmus zur Berechnung der Bewegungsrichtung hängt grundsätzlich davon ab, welche Situation eine simulierte Person in ihrem Blickfeld vorfindet:

1. Keine Personen
2. Personen außerhalb des Nahbereichs
3. Personen innerhalb des Nahbereichs

Befinden sich keine weiteren Personen im Sichtfeld einer Person, so richtet diese ihre Bewegung direkt auf die Ziellinie aus.

Befinden sich Personen im Sichtfeld, aber nicht im Nahbereich, so reagiert eine Person *ich* auf die gesamte Gruppe. Der Vektor *Eigenwirkung* ist der resultierende Vektor aller Personen innerhalb des Wahrnehmungsradius, die ungefähr in dieselbe Richtung laufen wie die Person *ich*. Der Vektor *Gegenwirkung* ist der resultierende Vektor aller Personen im Sichtfeld, die der Person *ich* entgegenlaufen. Bei der Berechnung der resultierenden Wirkungsvektoren einer Gruppe erhalten näher befindliche Personen eine höhere Gewichtung.

Befinden sich Personen im Nahbereich, so reagiert die Person *ich* auf die räumlich nächste sichtbare Person. Der Vektor *Eigenwirkung* ist dann der Bewegungsvektor der Person *ich*, der Vektor *Gegenwirkung* ist der Bewegungsvektor der Person *Nächster*.

Geometrische Konstellationen und Variablendefinitionen

Abbildung 7.4 zeigt die möglichen geometrischen Konstellationen bei entgegengerichteten Bewegungen von Gruppen oder Individuen im Bewegungsmodell. Die erste Situation *Gegengerichtet frontal* zeigt eine idealisierte Situation, bei der sich zwei Gruppen oder zwei Personen auf ein und derselben Geraden entgegenkommen. Es gibt unendlich viele Schnittpunkte der Bewegungsgeraden. Nur bei wohldefinierter Geschwindigkeit läßt sich ein eindeutiger räumlicher sowie zeitlicher Kollisionspunkt berechnen. Im Folgenden werden aber auch solche Konstellationen als *frontal*, d.h.

ohne signifikante Auslenkung bezeichnet, wenn innerhalb eines durch den Abstand $d_{i,p}$ zweier Personen definierter Raum für den Lotabstand derselben Personen gilt: $l_{i,p} < 2r_i$ bzw. $l_{i,p} - 2r_i < \epsilon$. Die Kollisionsgefahr ist bei einer frontal gegengerichteten Bewegung am größten.

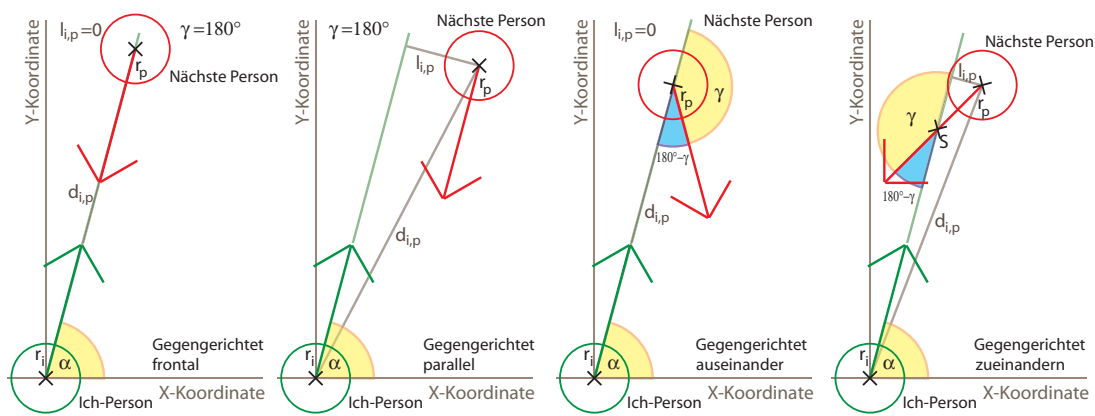


Abbildung 7.4: Gegengerichtete Bewegungen

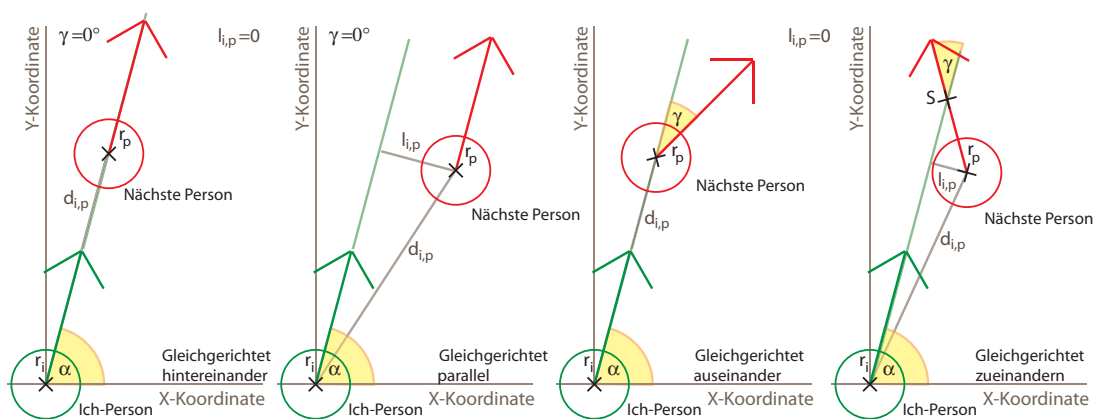


Abbildung 7.5: Gleichgerichtete Bewegungen

In der zweiten Situation *Gegengerichtet parallel* sollte die Person *ich* parallel an dem Hindernis vorbeilaufen und ggf. den lotrechten Abstand erhöhen. Ausweichen durch Kreuzen wäre hier nicht sinnvoll.

In der Situation *Gegengerichtet auseinander* liegt keine gravierende Kollisionsgefahr, da die entgegenkommende Person oder Gruppe ihrerseits ausweicht. Hier könnte die Person *ich* parallel ziehen, um die Situation auf die zuvor besprochene Situation *Gegengerichtet parallel* zurückzuführen, oder aber bremsen und abwarten, bis der Abstand zum geradeaus Weiterlaufen groß genug ist.

In der Situation *Gegengerichtet zueinander* besteht eine hohe Kollisionsgefahr, da sich die Bewegungslinien kreuzen. Hier besteht sowohl die Möglichkeit, parallel zu ziehen und den lotrechten

Abstand auf ein optimales Maß zu erhöhen³⁵, oder aber quer zu der Bewegungsrichtung des Hindernisses zu drehen³⁶, um den Abstand des Schnittpunktes von der eigenen Position zu verkleinern und zu der Position des Hindernisses zu vergrößern, mit dem Ziel, die Bewegungsgerade des Hindernisses zu passieren, bevor dieses den Schnittpunkt erreicht.

Ein Ausweichmanöver in Bezug auf Gruppen, die sich ungefähr in dieselbe Richtung bewegen wie die Person *ich*, ist nicht sinnvoll. Ausweichmanöver in Bezug auf ein gleichgerichtet vorlaufendes Individuum sind dann sinnvoll, wenn sich das die Person *Nächster* zu langsam bewegt. Abbildung 7.5 zeigt die vier entsprechenden Situationen.

In der Situation *Gleichgerichtet hintereinander* erscheinen Ausweichmanöver nach links und nach rechts gleich gut möglich. Hier entscheidet schließlich die Gesamtsituation, d.h. Zielausrichtung, weitere Personen, Türen, Wände, die Gewohnheit an Links- oder Rechtsverkehr sowie der Zufall.

In der Situation *Gleichgerichtet parallel* sollte die Person *ich* die langsamere Person *Nächster* parallel überholen und ggf. den lotrechten Abstand erhöhen.

In der Situation *Gleichgerichtet auseinander* ist ein Ausweichen in die entgegengesetzte Richtung geeigneter als ein Parallelziehen. Lediglich in der ganz rechts gezeigten Situation *Gleichgerichtet auseinander* kann kreuzen oder parallel ziehen von Vorteil sein.

Wenn sich eine gleichgerichtet vorlaufende Person oder Gruppe schnell genug bewegt, kann es sogar positiv sein, in der Nähe mit dem selben Richtungswinkel zu laufen und somit einen gewissen „Windschatteneffekt“ gegenüber anderen Hindernissen zu genießen.

7.3.9 Richtungsänderungen

Jede Person hat zu jedem beliebigen Zeitpunkt t die Möglichkeit, ihre Bewegungsrichtung zu ändern. Grund für eine Richtungsänderung könnte ein Ausweichmanöver, die Neuausrichtung auf ein Ziel oder ein Raum mit kurvigem Grundriß sein. Der Betrag der größtmöglichen Richtungsänderung $\delta\alpha_t^\oplus$ hängt von der Geschwindigkeit v_t zum Zeitpunkt t ab:

$$\delta\alpha_t^\oplus = \delta\alpha^\oplus(1 - 0,9\frac{v_t}{v^\oplus}) \quad (7.18)$$

Die optimale Richtungsänderung wird nicht analytisch berechnet, sondern iterativ angenähert. Dazu testet die Person für die beiden Seiten rechts und links je n verschiedene Ausrichtungsänderungen $0^\circ \leq \delta\alpha_i \leq \delta\alpha_t^\oplus$ mit $0 \leq i < n$ aus und bewertet die sich ergebenden Situationen mit Hilfe der in Abschnitt 7.3.11 beschriebenen Funktionen:

- Eigen- und Gegenwirkungen
- Zulässige Beschleunigung
- Ausrichtung auf Etappenziel
- Lotabstände von Hindernissen auf der Bewegungsgeraden
- Ausrichtung gegenüber Wänden

³⁵in der Abbildung entspräche dies einer Rechtsdrehung

³⁶in der Abbildung entspräche dies einer Linksdrehung

Die Anzahl n der diskreten Stichproben hängt davon ab, ob die neue Ausrichtung für eine Person oder für einen Klon berechnet werden soll. Bei den Originalpersonen beträgt n in der Regel 5, bei den Klonen weniger, je weiter sie sich in einer potentiellen Zukunft bewegen.

7.3.10 Beschleunigen

Die Beschleunigung ist neben der Richtungsänderung die einzige Möglichkeit der modellierten Personen, die eigene Bewegung zu steuern und zwischen alternativen Bewegungsfolgen zu wählen. Durch die Wahl der Beschleunigung ist es möglich, zu einem bestimmten Zeitpunkt ein gewähltes Geschwindigkeitsniveau zu erreichen, welches sich vor allem nach folgenden Kriterien richtet:

- Pünktliches Erreichen des Zieles bei gegebenen Restweg und Restzeit
- Bewegung mit einer nach persönlichem Empfinden komfortablen Geschwindigkeit
- Vermeidung von Kollisionen mit Querverkehr:
 - Beschleunigen, um vor dem Querverkehr zu kreuzen
 - Bremsen, um nach dem Querverkehr zu kreuzen

Die optimale Beschleunigung für die ersten beiden Kriterien können direkt aus dem numerischen Modellzustand berechnet werden. Die Entscheidung, wie Querverkehr zu kreuzen ist, wird mit Hilfe von *in die Zukunft tastenden* Klonen gefällt. Neben den genannten Kriterien gibt es allerdings noch das Kriterium der *maximal zulässigen Beschleunigung*, mit der die Personen ihre Geschwindigkeit so regeln, daß sie zu jeder Zeit mit einer Vollbremsung vor jedem Hindernis zum Stehen kommen können. Dieser Wert stellt also eine situationsabhängige und somit veränderliche Obergrenze dar und dient dem Schutz gegen Kollisionen. Die Berechnung dieses Sicherheitswertes wird im Folgenden beschrieben.

Parameter der Beschleunigung

Die Eigenschaft *Beschleunigung* besteht bei allen Personen aus drei Werten:

1. a^\ominus Maximale Bremsbeschleunigung, konstanter negativer Wert³⁷
2. a^\oplus Maximale Beschleunigung, konstanter positiver Wert
3. a_t Beschleunigung zum gegenwertigen Zeitpunkt, $a^\ominus \leq a_t \leq a^\oplus$

Anders als die Modellgeschwindigkeit $v_{i,t}$ ist die Modellbeschleunigung $a_{i,t}$ zum Zeitpunkt t unabhängig von ihrem Vorwert $a_{i,t-\delta t}$.

Optimale Beschleunigung

Die optimale Beschleunigung a_t^o zu einem Zeitpunkt t ist abhängig von der

- maximal möglichen Beschleunigung a^\oplus einer Person

³⁷Die „Maximale Bremsbeschleunigung“ müßte mathematisch korrekt „Minimale, betraglich maximale Bremsbeschleunigung“ heißen, da der Wert negativ ist und maximalen Abstand zu 0 hat.

- maximal zulässigen Beschleunigung a_t^* in einer bestimmten Situation zum Zeitpunkt t
- Beschleunigung a_t^z für das schnellstmögliche Erreichen der Zielgeschwindigkeit.

Sie ist zu jedem Zeitpunkt das Minimum der drei oben genannten Größen. Dabei gilt:

$$a_t^z = \frac{v_t^z}{\delta t} = \frac{\text{Restweg/Restzeit}}{\delta t} = \frac{s_t}{\Delta t \delta t} \quad (7.19)$$

Der Restweg bemißt die Strecke von der Position der Person bis zum Ziel, also zum Beispiel den Bahnsteig oder eine Zugtür. Die Restzeit ist die Differenz zwischen dem 'jetzt' t und der Abfahrt des Zuges t^\oplus abzüglich eines Puffers t_p .

Die maximal mögliche Beschleunigung ist ein Parameter der körperlichen Konstitution und wird den Personen zu Beginn der Simulation fest zugewiesen. Die maximal zulässige Beschleunigung hängt von Hindernissen wie andere Personen, Wänden und Türen in der Umgebung der Person ab und wird im Folgenden beschrieben.

Maximal zulässige Beschleunigung in der Umgebung von Wänden

Zunächst soll der relativ einfache Fall diskutiert werden, in dem Personen ihre Geschwindigkeit so regeln, daß sie nicht gegen unbewegte Hindernisse stoßen.

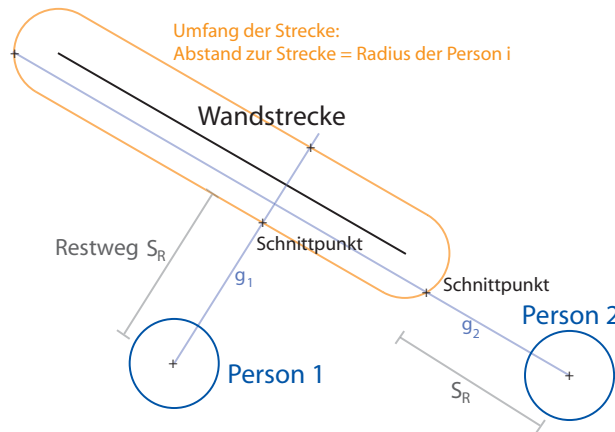


Abbildung 7.6: Prüfung einer möglichen Kollision mit einer Wand

Abbildung 7.6 veranschaulicht folgende Situation: Zwei Personen mit einem Körperradius r^\ominus bewegen sich entlang ihres jeweiligen Richtungsvektors. Eine Wand wird symbolisiert durch eine Strecke mit Längen- aber ohne Breitenausdehnung. Eine Kollision findet dann statt, wenn der Abstand zwischen dem Mittelpunkt einer Person und der Wandstrecke geringer ist als der Körperradius r^\ominus derselben Person. Um dies exakt berechnen zu können, wird eine Linie mit Abstand r^\ominus um die Strecke gelegt und geprüft, ob eine Gerade g durch den Mittelpunkt einer Person mit Richtung des korrespondierenden Bewegungsvektors die Umfangsline der Wandstrecke schneidet. Mit dieser Methode werden auch Kollisionsgefahren identifiziert, wenn sich Personen in Wandrichtung auf die Spitze einer Wand zubewegen, wie in Abbildung 7.6 durch Person 2 dargestellt.

Die Umrißlinie einer Wandstrecke besteht aus zwei Strecken und zwei Halbkreisen. Die beiden Strecken haben dieselbe Länge und dieselbe Richtung wie die Wandstrecke, sind aber um den Wert r^\ominus jeweils nach links bzw. rechts parallel verschoben. Die beiden Halbkreise besitzen den Radius r^\ominus und schirmen die Stirnseiten der Wand ab.

Von den Schnittpunkten, die die Bewegungsgerade der Person mit der Umrißlinie einer Wand hat, wird derjenige gewählt, der den geringsten Abstand zur Position der Person hat. Der Abstand ist die Restweglänge, die die Person noch in derselben Richtung weiterlaufen kann, bis es zu einer Kollision mit der Wand kommen würde, und wird mit s_R bezeichnet.

Die Berechnung der maximal zulässigen Beschleunigung in derselben Richtung unter Berücksichtigung der Restweglänge s_R funktioniert wie folgt³⁸:

Die Länge der Reststrecke s_R wird unterteilt in zwei Teilstücke s_B und s_V :

$$s_R = s_B + s_V \quad (7.20)$$

s_R	[m]	Restweglänge bis zum Hindernis zum Zeitpunkt t
s_B	[m]	Weg für die beschleunigte Bewegung zwischen den Zeitpunkten t bis $t + \delta t$
s_V	[m]	Weg für die Vollbremsung nach dem Zeitpunkt $t + \delta t$

Neben der zeitlich diskreten Schrittweite $t + \delta t$ für jeden Iterationsschritt der Simulation sind folgende Größen gegeben:

v_t	[m/s]	Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t
a^\ominus	[m/s]	Maximale Bremsbeschleunigung, $a^\ominus < 0$

Gesucht wird die maximal zulässige Beschleunigung a_t zum Zeitpunkt t . Es gilt:

$$s_B = v_t \delta t + \frac{1}{2} a_t \delta t^2 = (v_t + \frac{1}{2} a_t \delta t) \delta t \quad (7.21)$$

$$s_V = -2 \frac{v_{t+\delta t}^2}{a^\ominus} = \frac{(v_t + a_t \delta t)^2}{-2a^\ominus} \quad (7.22)$$

Zur Berechnung von a_t ist also folgende quadratische Gleichung zu lösen:

$$(v_t + \frac{1}{2} a_t \delta t) \delta t - \frac{(v_t + a_t \delta t)^2}{2a^\ominus} - s_R = 0 \quad (7.23)$$

Nach a_t aufgelöst bedeutet dies:

$$a_{t1,2} = \frac{a^\ominus}{2} - \frac{v_t}{\delta t} \pm \sqrt{\left(\frac{a^\ominus}{2} - \frac{v_t}{\delta t}\right)^2 - \frac{2a^\ominus(s_R - v_t \delta t) + v_t^2}{\delta t^2}} \quad (7.24)$$

Die gesuchte Lösung ist a_{t1} , da a_{t2} eine stark negative Beschleunigung errechnet, durch die $v_{t+\delta t}$ negativ würde, und die quadratische Gleichung auf unsinnige Art und Weise erfüllt würde.

³⁸Sämtliche in diesem Abschnitt verwendeten Formeln bilden keine Annahmen, sondern basieren auf den Grundgleichungen der Kinematik, nachzulesen u.a. in [16] und [17]

Da die Beschleunigung einer Person grundsätzlich im Intervall $[a^\ominus, a^\oplus]$ liegen muß, ist der verwendete Wert für die maximal zulässige Beschleunigung bezogen auf die betrachtete Wand wie folgt:

$$a_t^* = \min(a^\oplus, \max(a^\ominus, a_{t1})) \quad (7.25)$$

Befinden sich mehrere Wände im Reaktionsradius der Person, so wird die oben beschriebene Berechnung für alle Wände einzeln durchgeführt. Die maximal zulässige Beschleunigung ist dann das Minimum aller einzelnen berechneten Werte a_t^* für n Wände:

$$a_t^* = \min(a_{t,i}^*), \quad 1 \leq i \leq n \quad (7.26)$$

Maximal zulässige Beschleunigung in der Nähe von Personen

Etwas komplizierter sieht die Sache aus, wenn die Hindernisse beweglich sind, also zu der eigenen Bewegung nach die Bewegung des potentiellen Kollisionspartners hinzukommt. Um hier auf der 'sicheren Seite' vor Kollisionen zu sein, werden aus Sicht einer Person nur die ungünstigsten Bewegungsentscheidungen der anderen Personen berechnet. Dadurch werden Kollisionen auch bei anderen Entscheidungen der anderen Personen ausgeschlossen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und des Verständnisses wird die Person, die eine Entscheidung trifft, im Folgenden als *ich* bezeichnet, während die Personen, die durch ihre unbekannte und nicht beeinflussbare zukünftige Bewegung ein Kollisionsrisiko darstellen, als *Person* bezeichnet werden.

Der grundlegende Gedanke bei der Berechnung von maximal zulässigen Beschleunigungen gegenüber anderen Personen sieht vor, die Problemstellung auf die in Abschnitt 7.3.10 beschriebene Lösung zurückzuführen. Das heißt, für jede *Person* wird eine Strecke definiert, auf der alle Punkte liegen, die die *Person* in einem bestimmten Zeitintervall $[t_1, t_2]$ in der Zukunft betreten kann. Diese Strecke ist aus Sicht der Person *ich* in ihrer Wirkung wie eine Wand.

Dabei kommen folgende modellhaft vereinfachenden Annahmen zum Tragen:

- Die Personen ändern nur ihre Beschleunigung, nicht aber ihre Richtung³⁹
- Der Person *ich* sind die minimalen, maximalen und derzeitigen Werte für Geschwindigkeit und Beschleunigung aller übrigen Personen im Sichtfeld bekannt
- Eine Person verhindert Kollisionen nur, wenn sie in Bewegung ist. Sobald sie steht, trägt sie keine Schuld an Kollisionen mit anderen Personen

Abbildung 7.7 zeigt die Strecke S_P , auf der sich die *Person* im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ unter Berücksichtigung der genannten Annahmen auf jeden Fall befinden wird. Ein Endpunkt der Strecke ist der Punkt, an dem sich die Person zum Zeitpunkt t_1 befinden würde, wenn sie ab t eine Vollbremsung vollführen würde. Der andere Endpunkt der Strecke ist der Punkt, an dem sich die *Person* zum Zeitpunkt t_2 befinden würde, wenn sie so schnell wie möglich lief. Je weiter t_1 und t_2 in der Zukunft liegen, desto länger wird die Strecke S_P . t_1 und t_2 sollen nun möglichst präzise berechnet werden.

³⁹Es wird also davon ausgegangen, daß die Personen bereits auf ihr Ziel gerichtet laufen

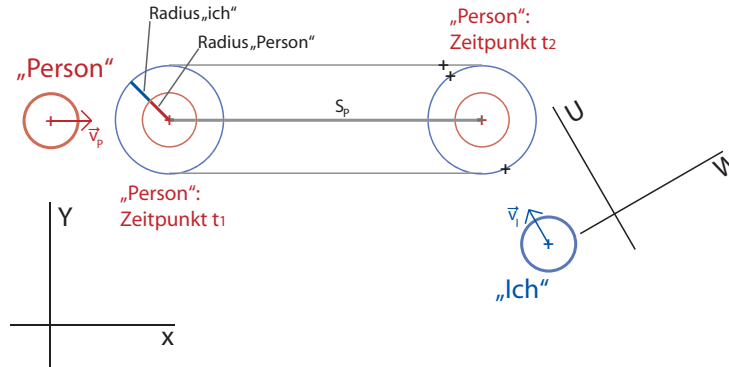


Abbildung 7.7: Virtuelle Wandstrecke aus möglichen zukünftigen Positionen einer Person

Spätestmögliche Kollision

Der einfacher zu ermittelnde Zeitpunkt ist t_2 , weil dieser nur von der *ich*-Person abhängt. Da die zu berechnende Beschleunigung nur für den nächsten Zeitschritt δt gilt, ist der spätestmögliche Zeitpunkt einer durch *ich* verschuldeten Kollision genau dann, wenn *ich* nach maximaler Beschleunigung im Zeitraum δt und anschließender Vollbremsung zum Stehen kommt:

$$\delta v = v^\oplus - v_t \quad (7.27)$$

$$\delta a = \min(a^\oplus, \frac{\delta v}{\delta t}) \quad (7.28)$$

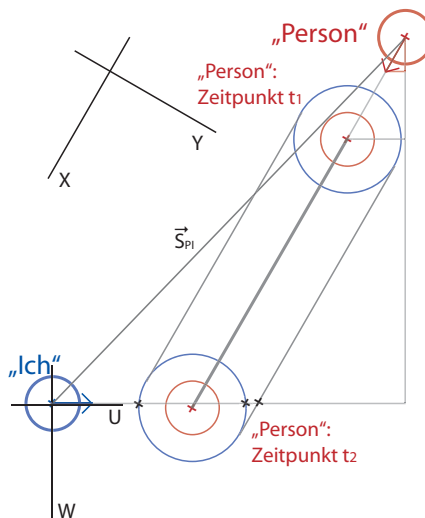


Abbildung 7.8: Transformation des Koordinatensystems und resultierende Bewegung

$$v_{t+\delta t}^{\oplus} = v_t + \delta a \delta t \quad (7.29)$$

$$t_2 = \delta t - \frac{v_{t+\delta t}^{\oplus}}{a^{\ominus}} \quad (7.30)$$

δv	$[m/s]$	$0 \leq \delta v \leq v^{\oplus}$	Mögliche Geschwindigkeitssteigerung
v^{\oplus}	$[m/s]$		Maximale Geschwindigkeit der <i>ich</i> -Person
a^{\oplus}	$[m/s^2]$		Maximale Beschleunigung
δa	$[m/s^2]$	$0 \leq \delta a \leq a^{\oplus}$	Beschleunigung während δt
$v_{t+\delta t}^{\oplus}$	$[m/s]$	$v_t \leq v_{t+\delta t}^{\oplus} \leq v^{\oplus}$	Maximale Geschwindigkeit nach δt

Frühestmögliche Kollision

Zur Bestimmung der frühestmöglichen Kollision muß die Resultierende aus beiden Bewegungen (*ich* und *Person*) ermittelt werden. Hierzu ist eine Transformation des Koordinatensystems nötig. Das Standard-X-Y-System wird ersetzt durch ein kartesisches U-W-Koordinatensystem, welches seinen Ursprung in der Position der *ich*-Person hat und so ausgerichtet ist, daß sich *ich* entlang der U-Achse bewegt, und Beschleunigung und Geschwindigkeit keine W-Komponente besitzen, siehe Abbildung 7.8.

Da sich die *ich*-Person nur in U-Richtung bewegt, ist der Zeitpunkt t_1 dadurch bestimmt, wann sich die Personen in U-Richtung frühestmöglich bis auf einen Abstand $r_I^{\ominus} + r_P^{\ominus}$, die Summe der beiden Körperradien, nahekomen. Die Berechnung der resultierenden Bewegung in U-Richtung sieht mathematisch ausgedrückt wie folgt aus:

$$f_U = \cos(\alpha_P - \alpha_I) \quad (7.31)$$

$$v_{R,u} = v_I - v_P f_U \quad (7.32)$$

$$v_{R,u}^{\ominus} = \underbrace{v_I^{\ominus}}_{=0} + \max(-f_U, 0) \underbrace{v_P^{\ominus}}_{=0} + \min(-f_U, 0) v_P^{\oplus} = \min(-f_U, 0) v_P^{\oplus} \leq 0 \quad (7.33)$$

$$v_{R,u}^{\oplus} = v_I^{\oplus} + \max(-f_U, 0) v_P^{\oplus} + \min(-f_U, 0) \underbrace{v_P^{\ominus}}_{=0} = v_I^{\oplus} + \max(-f_U, 0) v_P^{\oplus} \geq 0 \quad (7.34)$$

$$a_{R,u}^{\ominus} = a_I^{\ominus} + \max(-f_U, 0) a_P^{\ominus} + \min(-f_U, 0) a_P^{\oplus} \quad (7.35)$$

$$a_{R,u}^{\oplus} = a_I^{\oplus} + \max(-f_U, 0) a_P^{\oplus} + \min(-f_U, 0) a_P^{\ominus} \quad (7.36)$$

α_P	[°]	Ausrichtung der <i>Person</i> im X-Y-Koordinatensystem
α_I	[°]	Ausrichtung der <i>ich</i> -Person im X-Y-Koordinatensystem
f_U	[]	Faktor, Anteil der Bewegung der <i>Person</i> in U-Richtung
$v_{R,u}$	[m/s]	Resultierende Momentangeschwindigkeit in U-Richtung
$v_{R,u}^{\ominus}$	[m/s]	Minimale resultierende Geschwindigkeit in U-Richtung
$v_{R,u}^{\oplus}$	[m/s]	Maximale resultierende Geschwindigkeit in U-Richtung
$a_{R,u}^{\ominus}$	[m/s ²]	Maximale resultierende Bremsbeschleunigung in U-Richtung
$a_{R,u}^{\oplus}$	[m/s ²]	Maximale resultierende Beschleunigung in U-Richtung

Die Transformation des Koordinatensystems funktioniert wie folgt:

$$\vec{S}_{PI} = \vec{P} - \vec{I} \quad (7.37)$$

$$s_{PI} = \left| \vec{S}_{PI} \right| = \sqrt{(P_x - I_x)^2 + (P_y - I_y)^2} \quad (7.38)$$

$$s_{pi} = s_{PI} - r_P^{\ominus} - r_I^{\ominus} \quad (7.39)$$

$$\vec{S}_{pi} = \frac{s_{pi}}{s_{PI}} \vec{S}_{PI} \quad (7.40)$$

$$P_{I,X} = \frac{s_{pi}}{s_{PI}} (P_x - I_x) \quad (7.41)$$

$$P_{I,Y} = \frac{s_{pi}}{s_{PI}} (P_y - I_y) \quad (7.42)$$

$$P_{I,U} = \delta X' = \delta X \cos \alpha_i + \delta Y \sin \alpha_i = s_U \quad (7.43)$$

$$P_{I,W} = \delta Y' = -\delta X \sin \alpha_i + \delta Y \cos \alpha_i \quad (7.44)$$

\vec{S}_{PI}		Vektor von der Position von <i>ich</i> bis zur Position von <i>Person</i>
s_{PI}	[m]	Abstand zwischen den Positionen von <i>ich</i> und <i>Person</i>
s_{pi}	[m]	Wegstrecke zwischen <i>ich</i> und <i>Person</i> = Abstand abzüglich Körperradien
$P_{I,X}$	[m]	X-Koordinate von <i>Person</i> im verschobenen X-Y-Koordinatensystem ²
$P_{I,Y}$	[m]	Y-Koordinate von <i>Person</i> im verschobenen X-Y-Koordinatensystem ²
$P_{I,U}$	[m]	U-Koordinate von <i>Person</i> im gedrehten U-W-Koordinatensystem ²
s_U	[m]	Wegstrecke in U-Richtung zwischen <i>ich</i> und <i>Person</i> = $P_{I,U}$
$P_{I,W}$	[m]	W-Koordinate von <i>Person</i> im gedrehten U-W-Koordinatensystem ²

²mit Ursprung = Position *ich*

Falls $s_U < 0$, bewegt sich die *ich*-Person von der anderen *Person* weg, es besteht keine Kollisionsgefahr, und die maximal zulässige Beschleunigung kann in Bezug auf diese Situation auf die maximal mögliche Beschleunigung gesetzt werden: $a_t^* = a^\oplus$.

Falls $s_U > 0$, wird der Zeitpunkt t_1 wie folgt berechnet:

$$\delta v_{R,U} = v_{R,U}^\oplus - v_{R,U} \quad (7.45)$$

$$t_{R,b} = \frac{\delta v_{R,U}}{a_{R,u}^\oplus} = \frac{v_{R,U}^\oplus - v_{R,U}}{a_{R,u}^\oplus} \quad (7.46)$$

$$s_{R,b} = \min(s_U, \frac{1}{2} a_{R,u}^\oplus t_{R,b}^2) = \min(s_U, \frac{1}{2} \delta v_{R,U} t_{R,b}) \quad (7.47)$$

$$s_{R,g} = s_U - s_{R,b} \quad (7.48)$$

$$t_{R,g} = \frac{s_{R,g}}{v_{R,u}^\oplus} \quad (7.49)$$

$$t_1 = t_{R,b} + t_{R,g} \quad (7.50)$$

$\delta v_{R,U}$	[m/s]	Mögliche Geschwindigkeitssteigerung der resultierenden Bewegung
$t_{R,b}$	[s]	Zeit für die beschleunigte Bewegung bis $a_{R,u}^\oplus$
$s_{R,b}$	[m]	Weg für die beschleunigte Bewegung bis $a_{R,u}^\oplus$
$s_{R,g}$	[m]	Restweg für gleichmäßige Bewegung mit $v_{R,u}^\oplus$
$t_{R,g}$	[s]	Zeit für gleichmäßige Bewegung mit $v_{R,u}^\oplus$

Bei der Berechnung von t_1 mit Hilfe der resultierenden Beschleunigung und Geschwindigkeit wird aus Gründen der Vereinfachung ein kleiner Fehler in Kauf genommen: Es wird angenommen, daß beide beteiligten Personen *gleichzeitig* ihre maximalen bzw. minimalen Geschwindigkeiten erreichen, und die Resultierende daher wie eine Person, die auf ein unbewegtes Objekt reagiert, behandelt werden kann.

Berechnung der für eine Person reservierten Strecke

Nachdem die Zeitpunkte t_1 und t_2 bekannt sind, kann nun die dazugehörige Strecke berechnet werden. Falls $t_1 > t_2$, kann die Berechnung an dieser Stelle abgebrochen werden, da keine Kollisionsgefahr besteht⁴⁰, und die *ich*-Person bezogen auf die betrachtete Situation maximal beschleunigen darf.

Der Punkt P_1 wird aus t_1 und der Annahme einer Vollbremsung durch *Person* berechnet:

⁴⁰Der Zeitpunkt der frühestmöglichen Kollision liegt später als der Stillstand der *ich*-Person nach maximaler Beschleunigung und darauffolgender Vollbremsung

$$t_{b,1} = -\frac{v_{t,P}}{a_P^\ominus} \quad (7.51)$$

$$t_{P,1} = \min(t_1, t_{b,1}) \quad (7.52)$$

$$s_{P,1} = v_{t,P}t_{P,1} + \frac{1}{2}a_P^\ominus t_{P,1}^2 = t_{P,1}(v_{t,P} + \frac{1}{2}a_P^\ominus t_{P,1}) \quad (7.53)$$

$$P_{1,P} = P_P + s_{P,1} \begin{pmatrix} \cos \alpha_P \\ \sin \alpha_P \end{pmatrix} \quad (7.54)$$

$t_{b,1}$	[s]	Zeit für Bremsbewegung bis Stillstand <i>Person</i>
$v_{t,P}$	[m/s]	Geschwindigkeit der <i>Person</i> zum Zeitpunkt t
a_P^\ominus	[m/s ²]	Maximale Bremsbeschleunigung der <i>Person</i> , $a_P^\ominus < 0$
$t_{P,1}$	[s]	Tatsächliche Zeit für die Bremsbewegung bis zum Punkt P_1
$s_{P,1}$	[m]	Distanz von der Position der <i>Person</i> bis zum Punkt P_1
α_P	[°]	Bewegungsrichtung der <i>Person</i> , Winkel zur X-Achse

Der Punkt P_2 wird aus t_2 und der Annahme einer Bewegung mit maximaler Geschwindigkeit durch *Person* berechnet:

$$\delta v_P = v_P^\oplus - v_{t,P} \quad (7.55)$$

$$t_{b,2} = \min(t_2, \frac{\delta v_P}{a_P^\oplus}) \quad (7.56)$$

$$t_{g,2} = t_2 - t_{b,2} \quad (7.57)$$

$$s_{b,2} = \frac{1}{2}a_P^\oplus t_{b,2}^2 \quad (7.58)$$

$$s_{g,2} = v_P^\oplus t_{g,2} \quad (7.59)$$

$$s_{P,2} = s_{b,2} + s_{g,2} \quad (7.60)$$

$$P_{2,P} = P_P + s_{P,2} \begin{pmatrix} \cos \alpha_P \\ \sin \alpha_P \end{pmatrix} \quad (7.61)$$

δv_P	$[m/s]$	Mögliche Geschwindigkeitssteigerung der <i>Person</i>
$t_{b,2}$	$[s]$	Zeit für Restbeschleunigung der <i>Person</i>
$t_{g,2}$	$[s]$	Zeit für gleichförmige Bewegung bei v_P^\oplus
$s_{b,2}$	$[m]$	Weg für Restbeschleunigung der <i>Person</i>
$s_{g,2}$	$[m]$	Weg für gleichförmige Bewegung bei v_P^\oplus
$s_{P,2}$	$[m]$	Distanz von der Position der <i>Person</i> bis zum Punkt P_2

Die berechnete Strecke (P_1, P_2) wird nun aus Sicht der *ich*-Person zum Zeitpunkt t wie eine Wand interpretiert. Zu beachten ist, daß bei der Berechnung der maximal zulässigen Beschleunigung gemäß Abschnitt 7.3.10 als Radius für die Umrisslinie der Strecke nicht nur der Körperradius der *ich*-Person, sondern die Summe der Körperradien beider beteiligten Personen verwendet wird.

7.3.11 Bewertung von Situationen

Das Grundprinzip der numerischen Entscheidungsfindung für Bewegungsänderungen ist das Aussenden von *Klonen*, welche mögliche zukünftige Positionen, Geschwindigkeiten und Ausrichtungen der Personen einnehmen, bewerten, und das Ergebnis der Bewertung an die aussendende Person zurückgeben. Jede Person sendet vier Klone aus, die ihrerseits wiederum bis zu vier Klone aussenden, sodaß die Anzahl der Klone mit steigender Rechentiefe mit einem hierarchisch baumartigen Muster zunimmt. Die Person folgt am Ende dem Vorschlag ihres *besten* Klons.

Die Bewertung einer Situation ist kein Skalar, sondern ein zweidimensionaler Vektor. An der ersten Koordinate des Vektors steht ein Wert, der das *Ziel* der betrachteten Bewegungsabfolge bewertet. An der zweiten Koordinate steht eine Bewertung für den *Weg* dortin. Zwei Parameter ϕ und λ regeln die Art und Weise, wie die einzelnen Bewertungen verknüpft und an den Knotenpunkten in der hierarchischen Baumstruktur der Klone aggregiert werden. Dabei gewichtet

- ϕ den nächsten Schritt der Person selbst für die Koordinate *Weg*
- $1 - \phi$ die späteren Schritte von Klonen höherer Rechentiefe für die Koordinate *Ziel*
- λ den besten Klon aus einer Rechentiefe,
- $1 - \lambda$ die übrigen Klone aus derselben Rechentiefe

Die skalare Bewertung einer Situation wird durch die Multiplikation der beiden Koordinaten *Weg* und *Ziel* berechnet. Eine Übersicht über die Wirkungsweise der beiden Parameter auf die beiden Koordinaten eines Bewertungsvektors zeigt Tabelle 7.3.

Bewerter	Bewertung Weg	Bewertung Ziel	Σ	Π
Person selbst	ϕ	$1 - \phi$	1	
Bester Klon	$(1 - \phi)\lambda$	$\phi\lambda$	λ	
$n - 1$ Klone	$\frac{(1-\phi)(1-\lambda)}{n-1}$	$\frac{(1-\phi)(1-\lambda)}{n-1}$	$1 - \lambda$	
Σ	1	1		1

Tabelle 7.3: Bewertungsparameter

Die im Folgenden beschriebenen Bewertungsfunktionen liefern zunächst Skalare, die auf die beiden Koordinaten *Ziel* und *Weg* des Bewertungsvektors verteilt werden. Da die Aggregation multiplikativ ist, erfolgt eine Gewichtung jedes einzelnen Skalars durch Potenzierung mit einem Exponenten

zwischen 0 (kein Gewicht für diese Bewertung, da $x^0 = 1$ für alle x) und 2 (Quadrierung). Die einzelnen Skalare nehmen Werte zwischen 0 und 1 an, in wenigen Ausnahmen auch Werte über 1. Fällt eine Bewertung auf 0, so wird das ganze Produkt 0, und die ganze Situation wird als *unmöglich* bewertet.

Neben den beiden Bewertungsgruppen, die sich jeweils auf eine der beiden Koordinaten *Ziel* und *Weg* beziehen, gibt es noch eine dritte Gruppe, die sich gleichermaßen auf beide Koordinaten auswirken und einmultipliziert werden.

Bewertung Weg

Die Gruppe der Bewertung des nächsten Schrittes setzt sich aus drei Einzelbewertungen zusammen:

1. Eigen- und Gegenwirkungen
2. Geschwindigkeit
3. Zulässige Beschleunigung

Eigen- und Gegenwirkungen Die *Wirkung* $W_{i,t}$ einer Person i zum Zeitpunkt t ist eine Funktion aus ihrer Dominanz D_i , ihrer Eile $E_{i,t}$ und ihrer Geschwindigkeit $v_{i,t}$. Sie wird symbolisiert durch einen Vektor, der von der Position der Person ausgehend als Richtung die Bewegungsrichtung $\alpha_{i,t}$ der Person und die Länge

$$|W_{i,t}| = (v_{i,t} + \epsilon)E_{i,t}e^{D_i} \quad (7.62)$$

hat. Personen, die sich innerhalb eines Radius in eine ähnliche Richtung bewegen, erhalten zusätzlich einen gemeinsamen resultierenden Wirkungsvektor. Befindet sich die bewertende Person in unmittelbarer Nähe zu einer anderen Person, werden die beiden individuellen Wirkungsvektoren verglichen. Überschreitet der Abstand zur nächsten Person den Reaktionsradius $r_{i,t}^r = \sqrt{r_{i,t}r_{i,t}^\oplus}$, so werden die Wirkungsvektoren der beiden Gruppen verwendet.

Das Ziel der nun beschriebenen Funktion ist es, Abstand und Winkel zwischen zwei Personen oder zwei Gruppen von Personen zu optimieren. Dadurch werden Ausweichmanöver eingeleitet und das Aneinandervorbeilaufen geregelt.

Zunächst wird überprüft, ob eine *Person* j aus Sicht der *Ich*-Person i stört oder nicht. Eine andere Person innerhalb des Reaktionsradius stört genau dann, wenn eine der drei folgenden Bedingungen eintritt:

1. Die Person läuft entgegen
2. Die Person läuft quer
3. Die Person läuft voran in die gleiche Richtung, aber zu langsam

Eine Störung tritt also *nicht* ein, wenn die andere Person voran in die gleiche Richtung läuft mit einer Geschwindigkeit $v_{j,t} \geq v_{i,t}$. Liegt eine Störung vor, wird der *Lotabstand* $l_{i,j,t}$ bewertet:

$$a = \frac{l_{i,j,t}}{r_{i,t} + r_{j,t}^{\ominus}} = \begin{cases} > 1 & \text{Abstand ausreichend} \rightarrow \text{parallel} \rightarrow \text{Bewertung} = \frac{1}{2}(1 + \cos \delta\alpha_{i,j,t}) \\ \leq 1 & \text{Abstand zu gering} \rightarrow \text{ausschrenen} \rightarrow \text{Bewertung} = \frac{1}{2}(1 + \sin \delta\alpha_{i,j,t}) \end{cases} \quad (7.63)$$

Stört die andere Person oder Gruppe nicht, läuft aber zufällig in dieselbe Richtung, so lohnt es sich ebenfalls, parallel mitzulaufen:

$$\text{Bewertung} = \frac{3 + \cos \delta\alpha_{i,j,t}}{4} \quad (7.64)$$

$\alpha_{i,j,t}$ ist der Winkel zwischen den beiden Bewegungsrichtungen der Personen i und j zum Zeitpunkt t . Abbildung 7.9 veranschaulicht die geometrische Konstellation.

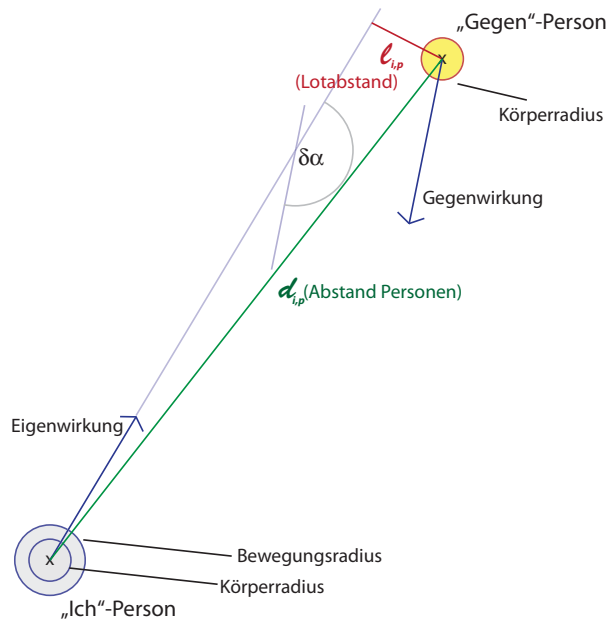


Abbildung 7.9: Bewertung der Lage von Eigen- und Gegenwirkungen

Geschwindigkeit Eine Person sollte sich möglichst mit Zielgeschwindigkeit $v_{i,t}^z$, mindestens jedoch mit ihrer durch den Bewegungskomfort definierten Mindestgeschwindigkeit bewegen. Daher werden abweichende Geschwindigkeiten durch eine schlechte Bewertung sanktioniert:

$$\text{Bewertung} = \frac{1}{1 + \max(v_i^{\ominus} - v_{i,t}, 0) + |v_{i,t} - \max(v_i^{\ominus}, v_{i,t}^z)|} \quad (7.65)$$

Beschleunigung Der Beschleunigung fällt als Steuerungsgröße für die Geschwindigkeit eine zentrale Rolle zu und wird unter zwei Aspekten bewertet: Sanktionierung von

1. Positionen und Bewegungsrichtungen mit niedrigen zulässigen Beschleunigungen¹
2. stark wechselnden Beschleunigungswerten²

Im ersten Fall wird die Möglichkeit einer günstigen Beschleunigung, im zweiten Fall die Beschleunigung selbst bewertet:

$$\text{Bewertung} = \underbrace{\frac{a_t^* - a^\ominus}{a^\oplus - a^\ominus}}_1 \underbrace{\frac{a^\oplus}{\max(a^\oplus, |a_t - a_{t-\delta t}|)}}_2 \quad (7.66)$$

a_t^*	$[m/s^2]$	Maximal zulässige Beschleunigung
a^\ominus	$[m/s^2]$	Betraglich maximale Bremsbeschleunigung <0
a^\oplus	$[m/s^2]$	Maximale Beschleunigung
a_t	$[m/s^2]$	Beschleunigung zum Zeitpunkt t
$a_{t-\delta t}$	$[m/s^2]$	Beschleunigung zum Zeitpunkt $t - \delta t$

Bewertung Ziel

Bewertung Wegstrecke Weniger relevant für den nächsten Schritt als für die ganze zu bewertende Schrittfolge ist die Frage, ob die Bewegungsentscheidung eine Person ihrem Ziel räumlich näher bringt. Positiv bewertet wird aber nicht nur eine Verkürzung der Distanz zum jeweiligen Ziel, sondern auch die Tatsache, dass die Person überhaupt eine Wegstrecke zurücklegt, sei es in Richtung Ziel, oder sei es in einem Ausweichmanöver.

$$\text{Bewertung} = \frac{\text{Zurueckgelegter Weg}}{\text{Weg bis (Etappen-) Ziel}} = \frac{s_t^\oplus}{s_0 + s_t + s_{i,t}^e} \quad (7.67)$$

s_t^\oplus	$[m]$	Bereits gelaufene Strecke zum Zeitpunkt t	steigt
s_t	$[m]$	Noch mindestens zu laufende Strecke zum Zeitpunkt t	sinkt
s_0	$[m]$	Minimale Gesamtwegstrecke $s_{t=0}$	konstant
$s_{i,t}^e$		Entfernung zum nächsten Etappenziel	

Bewertung Zielausrichtung der Bewegung Die räumliche Ausrichtung auf das Bewegungsziel ist ein wichtiges, aber kein alles entscheidendes Kriterium, da für Ausweichmanöver und Umwege zwischenzeitlich eine Abweichung von der optimalen Zielausrichtung in Kauf genommen wird. Die Einhaltung der Zielausrichtung wird mit wachsender Nähe zum jeweiligen Etappenziel wichtiger.

$$a = \min\left(2, \frac{s_{i,t}^e}{r_{i,t}^r}\right) \quad (7.68)$$

¹aufgrund von Hindernissen und daraus resultierenden Kollisionsgefahren

²d.h. ruckartiges Gehen

$$b = \begin{cases} 1,01 & , \text{Einhaltung Rechts- / Linksverkehr} \\ 1,0 & , \text{Entgegen Rechts- / Linksverkehr} \end{cases} \quad (7.69)$$

$$c = \begin{cases} 1 & , \text{Person sieht Etappenziel} \\ 1/4 & , \text{Person sieht Etappenziel nicht} \end{cases} \quad (7.70)$$

$$\text{Bewertung} = bc \frac{a + \cos \delta\alpha_{i,t}}{a + 1} \quad (7.71)$$

- a Faktor Nähe zum Etappenziel
 b Faktor Einhaltung Rechts- / Linksverkehr nach Kulturkreis
 c Faktor Sichtbarkeit Etappenziel
 $\delta\alpha_{i,t}$ [°] Abweichung von der optimalen Zielausrichtung

Bewertung Streß Diese Bewertungsfunktion sanktioniert Situationen, in denen Personen Streß empfinden aufgrund von körperlicher Enge oder durch Zeitknappheit bedingte Hektik.

$$\text{Bewertung} = 1 - \frac{E + H}{2} = 1 - \frac{\frac{\rho_t}{\rho^\oplus} + \frac{\eta_t}{\eta^\oplus}}{2} > 0 \quad (7.72)$$

Bewertungen für Ziel und Wegstrecke

Die im Folgenden beschriebenen Bewertungsfunktionen sind gleichermaßen für den nächsten Schritt als auch für die Zielposition der zu prüfenden Schrittfolge relevant und fließen daher in beide Koordinaten des Bewertungsvektors ein.

Bewertung Lotabstände der Hindernisse in Bewegungsrichtung Diese Funktion bewertet den senkrechten Abstand der im Blickfeld befindlichen Hindernisse⁴¹ auf die Bewegungsgerade der betreffenden Person, wobei sowohl ein geringer Lotabstand zur Bewegungsgeraden als auch ein geringer Abstand zur Person selbst negativ bewertet werden.

Abbildung 7.9 veranschaulicht die geometrische Konstellation bei Personen, die als Hindernisse auftreten, wobei alle Personen im Blickfeld in die Bewertung mit einfließen. Bei den Wänden und Türen wird nur das Hindernis berücksichtigt, welches sich am nächsten in positiver Blickrichtung zur Person befindet. Als zu bewertender Punkt wird entweder der Schnittpunkt der Wandstrecke mit der Bewegungsgeraden verwendet, oder, falls nicht vorhanden, der nächste Punkt zur Person.

¹innerhalb eines Kreises, beschrieben durch den eigenen Reaktionsradius

²Siehe Abschnitt 7.3.2

⁴¹Personen, Wände, Türen

$$\text{Bewertung} = 1 \prod \underbrace{\frac{\sqrt{(d_{p,j,t} + l_{p,j,t})l_{p,j,t}}}{1, 1 r^\oplus}}_{\text{Personen}} \underbrace{\frac{\min(d_{w,k,t})}{r^\oplus}}_{\text{Wand}} \quad (7.73)$$

$d_{p,j,t}$	$[m]$	Abstand der j-ten <i>Person</i> zur <i>Ich</i> -Person zum Zeitpunkt t
$l_{p,j,t}$	$[m]$	Lotabstand der j-ten <i>Person</i> zur Bewegungsgeraden der <i>Ich</i> -Person
r^\oplus	$[m]$	Maximaler Sichtradius der <i>Ich</i> -Person
$d_{w,k,t}$	$[m]$	Abstand der k-ten Wand zur <i>Ich</i> -Person zum Zeitpunkt t

Bewertung Aufprall Diese Funktion liefert den Wert 1, falls die Position keine Kollision mit einem Hindernis verursacht, oder 0:

$$\text{Bewertung} = \prod_{i \neq j}^{n_P} (1 - 1_{\{\text{Aufprall mit Person } j \text{ in } t + \gamma \delta t\}}) \prod_{k=1}^{n_K} (1 - 1_{\{\text{Aufprall mit Wand } k\}}) \quad (7.74)$$

Eine Kollision zwischen zwei Personen ist dann gegeben, wenn für den Abstand $d_{i,p,t+\gamma\delta t}$ zum einem Zeitpunkt $t + \gamma\delta t$ gilt:

$$d_{i,p,t+\gamma\delta t} < r_i^\ominus + r_p^\ominus \quad (7.75)$$

Für die Kollisionsprüfung zwischen zwei Personen ist $\gamma = 0$, da sich beide in derselben Zeit befinden. Wird jedoch die Kollision zwischen einem Klon und einer Person geprüft, so muß die Person virtuell um ein Vielfaches γ von δt gleichförmig bewegt werden, da ein Klon stets zukünftige Szenarien ertastet und bewertet.

Eine Kollision mit einer Wand liegt dann vor, wenn eines der drei folgenden Ereignisse eintritt:

1. Der Abstand $d_{w,i,t}$ zur Wand ist kleiner als der Körperradius r^\ominus der *Ich*-Person.
2. Der Bremsweg der *Ich*-Person schneidet die Wand
3. Der letzte Schritt der *Ich*-Person schneidet die Wand

Ausrichtung auf Wand In der Nähe einer Wand ist es ratsam für Personen, sich parallel zur Wand oder von ihr weg zu bewegen, jedoch nicht auf die Wand zu.

Falls sich mindestens ein Punkt der Wandstrecke *vor* der Person, und die Wand sich nicht hinter dem nächsten Etappenziel befindet, und folgende Ungleichung gilt:

$$d_{k,t} < \frac{s_{w,k}}{2} \quad (7.76)$$

dann fließen die Daten der Wand in folgende Bewertungsfunktion mit ein:

$$\text{Bewertung} = \frac{\sum_{k=1}^{n_K} \cos^2 \delta \alpha_t d_{k,t}}{n r_t^r} \frac{\min(d_{k,t})}{r_t} \quad (7.77)$$

$$r_t^r = \sqrt{r_t^\oplus r_t} \quad (7.78)$$

$\delta\alpha_t$	$[\]$	Winkel zwischen dem Bewegungsvektor der <i>Ich</i> -Person und der Wandstrecke
$s_{w,k}$	$[m]$	Länge der Wandstrecke
n	$[\]$	Anzahl der Wände, deren Daten in die Bewertung einfließen
r_t^r	$[m]$	Reaktionsradius zum Zeitpunkt t
$d_{k,t}$	$[m]$	Abstand zur Wand k

Bewertung Partner

Diese Funktion trägt Sorge dafür, daß simulierte Kinder bei ihren simulierten Eltern und simulierte Paare beieinander bleiben. Falls eine Personen einen Partner hat, gilt folgende Funktion:

$$\text{Bewertung} = \frac{1}{(d_{p,t} - r_i^i - r_p^\ominus)^2 + 1} \quad (7.79)$$

Falls die Person keinen Partner zugeordnet hat, ist die Bewertung 1.

$d_{p,t}$	$[m]$	Abstand zwischen <i>Ich</i> -Person und Partner
r_i^i	$[m]$	Intimitätsradius der <i>Ich</i> -Person
r_p^\ominus	$[m]$	Körperradius des Partners / der Partnerin

7.4 Messungen und Erhebungen zu Personenbewegungen

Um das Modell hinsichtlich der kinematischen Größen zu kalibrieren, wurden typische Beschleunigungen und Geschwindigkeiten von Personen in Bahnhöfen gemessen. Alle anderen Parameter wie Sichtweite, Reaktionsradius, maximale Drehung bei gegebener Geschwindigkeit beruhen auf Annahmen aufgrund qualitativer Beobachtungen.

7.4.1 Messung von Beschleunigungen

Die Messung von positiven wie negativen Beschleunigungen erfolgte mit Hilfe eines Dataloggers, der die Beschleunigungskräfte in alle drei Raumrichtungen mißt und in einer Frequenz von 1/10s abspeichert. Der Träger des Dataloggers hat sich während der Messungen synchron mit Reisenden bewegt, die sich ohne Meßgerät real im Darmstädter Hbf bewegt haben.

Die Meßergebnisse sind jedoch nicht zufriedenstellend. Der menschliche Körper ist in der Lage, einzelne Gliedmaßen und Körperteile kurzfristig sehr stark zu beschleunigen. So wurde die Messung der Beschleunigung, mit der sich der gesamte Körper in Bewegung setzt, häufig von punktuellen Beschleunigungen von bis zu $15m/s^2$ überlagert. Als durchschnittliche Beschleunigung, mit der der menschliche Körper bis zu seiner Höchstgeschwindigkeit in Bewegung gesetzt wird, scheint jedoch ein Wert von $4m/s^2$ realistisch, der in dem vorliegenden Modell als maximale Beschleunigung verwendet wird. Für Jugendliche und Kinder hingegen wird ein Wert von $5m/s^2$, für Greise von $1m/s^2$ verwendet.

Mittlere Geschwindigkeit [m/s]	Kategorie Bewegung
0,94	langsam, schlendernd
1,05	ausweichend
1,11	Treppe aufwärts
1,20	Treppe abwärts
1,28	normal gehen
1,46	zügig, zielstrebig
1,67	eilig

Tabelle 7.4: Typische Geschwindigkeiten von Fußgängern in Bahnhöfen

7.4.2 Messung von Geschwindigkeiten

Die Messung von Geschwindigkeiten erfolgte indirekt durch Zeitmessung für reale Bewegungen von Reisenden auf bestimmten Strecken im Darmstädter Hbf. Sie liefert robuste Ergebnisse:

Die höchste gemessene Geschwindigkeit lag bei $2,05\text{m/s}$, die niedrigste bei $0,65\text{m/s}$, der Gesamtdurchschnitt bei $1,35\text{m/s}$.

Im vorliegenden Modell wird daher für Erwachsene eine Maximalgeschwindigkeit von $2,1\text{m/s}$ und eine komfortbedingte Mindestgeschwindigkeit von $0,7\text{m/s}$ verwendet.

Unterteilt man die Meßergebnisse in die beiden Richtungen *zum Zug* und *zum Ausgang*, so stellt man fest, daß in Richtung Zug die Bewegungskategorien mit einer höheren Geschwindigkeit häufiger vorkommen als Richtung Ausgang, und daß Bewegungen derselben Kategorie durchschnittlich $0,1\text{m/s}$ schneller ablaufen. Ein ausgeprägtes Ausweichverhalten zeigen bei den Messungen ausschließlich Personen, die vom Zug kommend in Richtung Ausgang laufen. Das spricht dafür, Personen mit Bewegungsziel *Zug* im Modell mit einer höheren Dominanz auszustatten.

Eine weitere interessante Beobachtung liegt darin, daß Personen, die auf ihrem Weg zwischen *Vorplatz Ost* und *Bahnsteig* sowohl die *Empfangshalle* als auch den *Gang* zwischen *Empfangshalle* und *Querbahnsteig* durchlaufen, in der *Halle* durchschnittlich $0,2\text{m/s}$ langsamer laufen als im *Gang*. Dies liegt offensichtlich daran, daß der *Gang* seitlich begrenzt ist und kaum Querverkehr existiert, während sich die Halle vor allem in Südrichtung öffnet und die Personen aufgrund des zu erwartenden Querverkehrs intuitiv langsamer gehen.

Es zeigt sich außerdem, daß die Varianz der Geschwindigkeiten im Gebäude und auf dem Querbahnsteig geringer ist als auf den Treppen und den Bahnsteigen. Im Gebäude herrscht also annähernd ein allgemeines Geschwindigkeitsniveau, dem sich viele Personen anpassen, unabhängig davon, wie eilig sie es haben. Die Geschwindigkeiten auf den Bahnsteigen und den Treppen ist jedoch sehr individuell und schwankt daher stark.

Zuletzt sei noch die Beobachtung erwähnt, daß das Geschwindigkeitsniveau innerhalb des Gebäudes nicht von der Jahreszeit beeinflusst wird. In den Außenbereichen bewegen sich die Personen jedoch in den Sommermonaten um $0,2\text{m/s}$ schneller als in der kalten Jahreszeit.

7.5 Simulationsszenarien

Das Bewegungsmodell soll beispielhaft auf die in Abschnitt 6.1.1 beschriebene Situation im Hauptbahnhof Frankfurt am Main demonstriert werden. Die beiden Alternativen bezüglich der baulichen Trennung von Reisezentrum und Bahnsteighalle sind auch hier die beiden Grundvarianten. Diese sollen sowohl für den Sommer- als auch Winterfall getestet werden. Kombiniert mit jeweils zwei Varianten bezüglich der

- Größe der Türsensorfelder⁴²
- Geschwindigkeit der Türen
- Anzahl / Dichte der Personen

ergeben sich wie in Abbildung 7.10 dargestellt $2^5 = 32$ Simulationsläufe, die durch die Zufälligkeit einiger Bewegungsentscheidungen jeweils mehrfach wiederholt werden. Aus Platzgründen werden in dieser Arbeit jedoch nur einige spezielle Varianten dargestellt und besprochen.

7.5.1 Datenmodell

Die räumliche Geometrie des Modells ist in Abbildung 7.11 dargestellt. Rote Linien symbolisieren mögliche Etappenziele, schwarze Linien Wände. Im Zentrum der Geometrie befindet sich die Pufferzone, am oberen Rand das Reisezentrum, unten die Bahnsteighalle. Die weißen Flächen sind Pfeiler, zwischen denen sich Glaswände oder Glasschiebetüren befinden, welche im IST-Zustand Luftschleieranlagen und deshalb eigene schmale Klimazonen besitzen⁴³. Die gelben Hilfslinien sind Achsen und dienen der maßstäblichen Orientierung. Ihre Beschriftung bezieht sich auf den Abstand zum äußersten Punkt links unten in [m].

Die verwendeten Parameter für verschiedene Personentypen sind in Tabelle 7.5 dargestellt.

Person	v^\ominus [$\frac{m}{s}$]	v^\oplus [$\frac{m}{s}$]	a^\ominus [$\frac{m}{s^2}$]	a^\oplus [$\frac{m}{s^2}$]	$\Delta\alpha_{v=0}$ [°]	β^\ominus [°]	β^\oplus [°]	ρ^\oplus [$\frac{m^2}{m^2}$]	r^\ominus [m]	r^i [m]	r^\oplus [m]	T ⁴⁴
Erwachsener	0,7	2,1	-4	4	150	60	180	0,20	0,25	0,45	8	4
Jugendlicher	1,0	2,4	-5	5	180	60	180	0,25	0,22	0,32	7	4
Kind	0,4	1,5	-4	4	210	60	120	0,30	0,18	0,50	5	3
Greis	0,2	0,5	-2	1	75	60	120	0,15	0,25	0,75	5	4
Blinder	0,2	0,5	-2	2	90	120	120	0,10	0,25	0,75	1	1
Rollstuhlfahrer	0,2	0,5	-2	2	15	60	60	0,10	0,40	0,90	3	5

Tabelle 7.5: Eigenschaften von Personentypen

⁴²und damit dem Reaktionsverhalten der Türen

⁴³Klimazonen sind farblich unterschiedlich unterlegt.

⁴⁴Rekursionstiefe bezüglich der Entsenden und Bewertung von Klonen

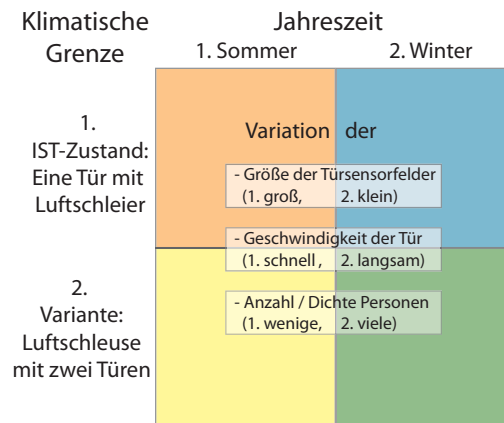


Abbildung 7.10: Simulationsszenarien Bewegungsmodell am Beispiel Reisezentrum Frankfurt Hbf

7.6 Darstellung der Simulationsergebnisse

Abbildung 7.12 zeigt das geometrische Modell gegen Ende eines Simulationsdurchgangs. Es handelt sich um eine Variante mit Türschleuse, das heißt Außentüren zwischen der Pufferzone und der Bahnhofshalle sowie Innentüren zwischen Puffer und Reisezentrum. Die Türsensoren sind klein, Luftschleieranlagen existieren nicht. Von den insgesamt 16 simulierten Personen besitzen zwei

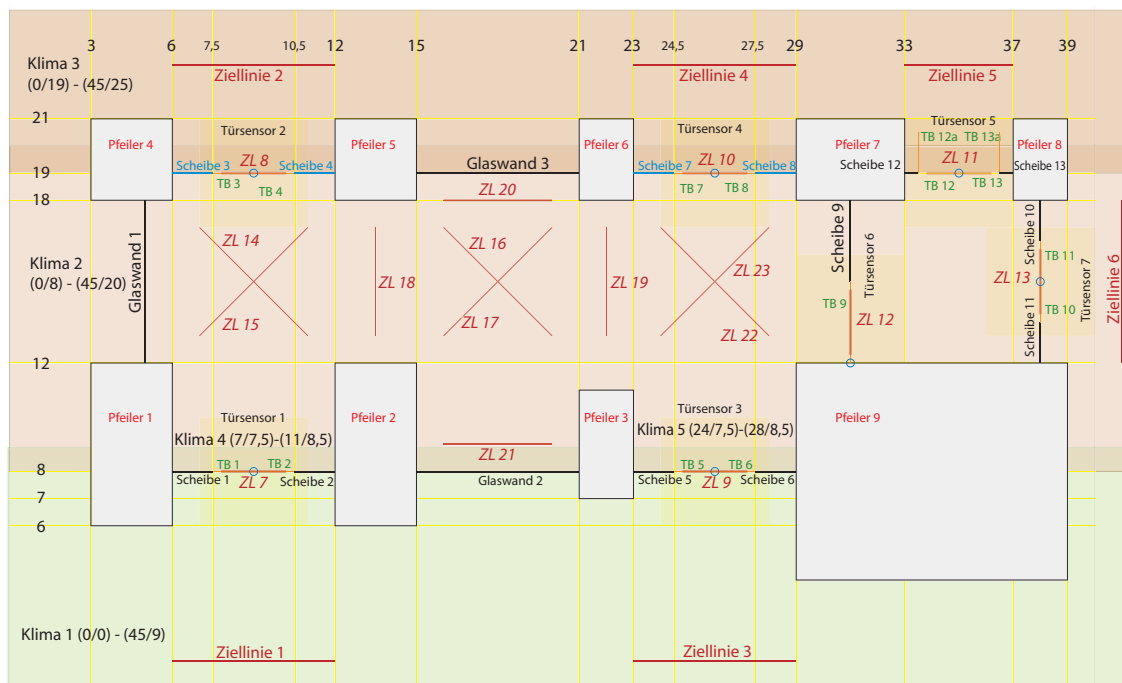


Abbildung 7.11: Räumlich geometrisches Datenmodell

einen *Monitor*, was bedeutet, daß all ihre Zustände während der Simulation tabellarisch festgehalten werden, und daß sie in der Grafik eine Spur hinterlassen. Die Person mit dem Startpunkt im Reisezentrum bewegt sich durch die Pufferzone und verläßt das Modell schließlich in Richtung Querbahnsteig. Die Person mit dem Startpunkt in der Bahnhofshalle bleibt in der Pufferzone acht Sekunden vor einer Informationstafel stehen, vollführt kurz danach ein Ausweichmanöver und verläßt das Modellgebiet ebenfalls in Richtung Querbahnsteig. Drei weitere Personen ohne Monitor sind zum Zeitpunkt des dargestellten Modellzustandes noch nicht im Ziel. Ihre farbliche Darstellung deutet an, daß sie einen Hektikwert von annähernd 1 haben.

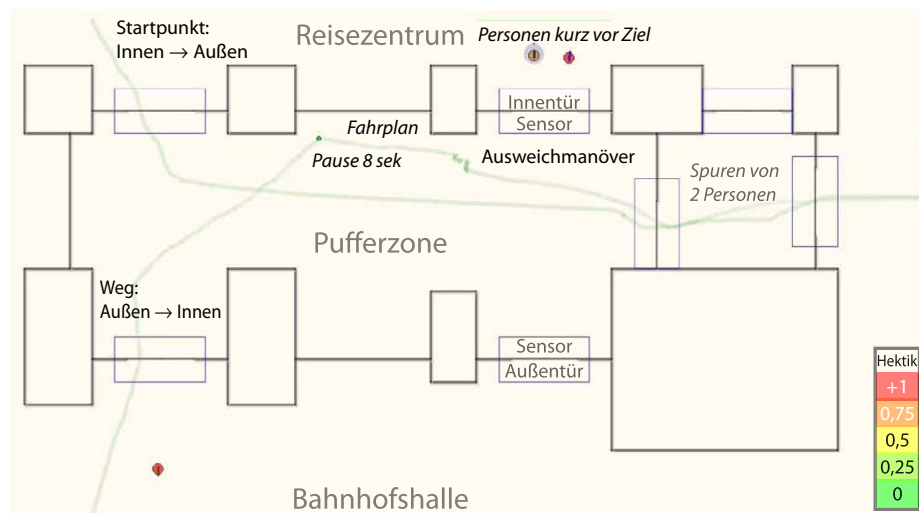


Abbildung 7.12: Bewegungsspuren von 2 Personen durch die Pufferzone Reisezentrum FFM

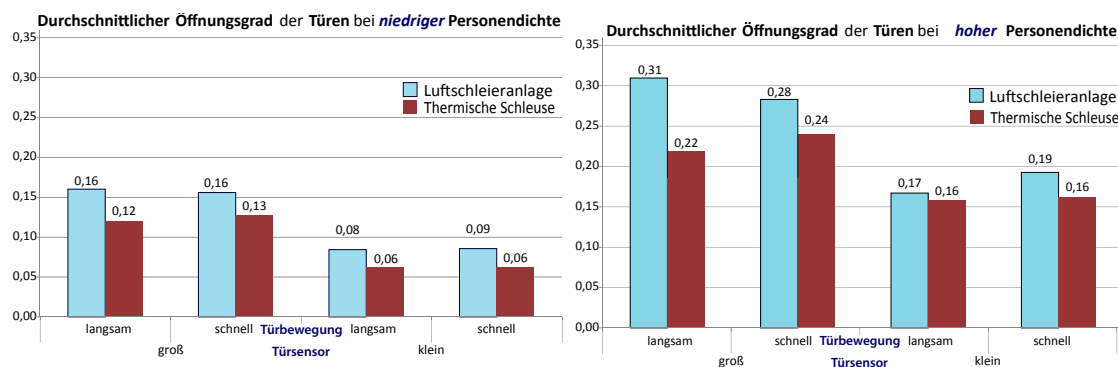


Abbildung 7.13: Durchschnittlicher Türöffnungsgrad, abhängig von Türbewegung und -sensor

Folgend werden die in Abschnitt 7.5 dargestellten Varianten diskutiert hinsichtlich

- Energieverbrauch des Reisezentrums,
- thermisches Komfortempfinden der Besucher,
- Hektik- und Engeempfinden der Besucher.

Parameter	Standardausprägung 1	Alternative Ausprägung
<i>Geschwindigkeit</i> der Tür	50%/s	100%/s
Tiefe der <i>Türsensorfelder</i>	1m	2m
Klimatische <i>Zonengrenze</i>	<i>thermische Schleuse</i>	<i>Außentüren mit Luftschleieranlage</i>
<i>Personendichte</i>	4 Personen	12 Personen

Tabelle 7.6: Parameter hinsichtlich Türbewegungen

Anders als in Kapitel 6 werden hier keine Energieströme simuliert. Die simulierten Werte dienen aber dazu, qualitative Vergleiche zwischen den Varianten zu ziehen. Für den Energieverbrauch sind zwei Kenngrößen relevant:

1. Türöffnungsgrad als Maß für den Exergieverlust durch thermische Ausgleichströme
2. Türbewegung als qualitatives Maß für die Umwandlung elektrischer in kinetische Energie

Für die Bewertung des thermischen Komfortempfindens wird die Berechnung des PMV-Wertes durch P.O. Fanger[8]⁴⁵ durchgeführt. Auch dieser Wert ist qualitativ zu beurteilen, da der PMV-Wert auf Erhebungen unter stationären Bedingungen in klimatisierten Räumen beruht, und nicht 1:1 auf die Situation in Bahnhöfen übertragbar ist.

7.6.1 Türbewegungen

Hinsichtlich der Türbewegungen sind die in Tabelle 7.6.1 die zu unterscheidenden Parameter.

Bei der Variante *Thermische Schleuse* befinden sich Innentüren zwischen dem Reisezentrum und der Pufferzone. Bei der Bestandsvariante *Luftschleieranlagen* gibt es keine Innentüren, dafür sind die Türen zwischen Pufferzone und Bahnsteighalle zusätzlich mit Luftschleieranlagen ausgestattet⁴⁶. Die Variante *hohe Personendichte* wird in zwei Untervarianten geteilt:

- 12 Personen kommen durch dieselben 2 Türen wie 4 Personen bei niedriger Personendichte
- 12 Personen kommen durch 6 verschiedene Türen

Beim Vergleich der beiden Diagramme in Abbildung 7.13 fällt auf, daß die Verdreifachung der Personendichte einerseits oder die Verdopplung der Türsensorfläche andererseits jeweils eine Verdopplung des durchschnittlichen Türöffnungsgrades verursachen. Lediglich die Geschwindigkeit, mit der sich die automatischen Schiebetüren bewegen, hat kaum Einfluß auf den durchschnittlichen Öffnungsgrad der Türen. Dabei ist zu bedenken, daß schnellere Türen mehr Energie für die Beschleunigung ihrer Masse benötigen. Abbildung 7.13 zeigt außerdem, daß der Öffnungsgrad je Tür höher ist, wenn weniger Türen vorhanden sind. Abbildung 7.14 links zeigt, wie sich der Öffnungsgrad je Tür verändert, wenn die Personen durch sechs statt durch zwei Türen den Vorraum betreten: Der Öffnungsgrad je Tür wird halbiert. Da jedoch die dreifache Anzahl Türen insgesamt geöffnet wird, erfährt der Raum eine Veranderthalbfachung der Öffnung nach außen. Das Diagramm auf der rechten Seite stellt dasselbe Simulationsergebnis wie Abbildung 7.13 dar. Hier

⁴⁵siehe auch Abschnitt 3.6.4

⁴⁶vergleiche Abbildung 7.17

wird jedoch dem Umstand Rechnung getragen, daß die Anzahl Türen in der (Bestands-) Variante *Luftschleieranlage* nur halb so groß ist wie in der Variante *Thermische Schleuse*. Nimmt man vereinfachend an, daß die Luftschleieranlage über der Außentür in Kombination mit der permanenten Öffnung der Innentür einem dauerhaften Öffnungsgrad von 75% der Innentür entspricht, sieht der durchschnittliche Öffnungsgrad bezogen auf den Raum, unabhängig von der Türeanzahl aus wie in Abbildung 7.14 rechts.

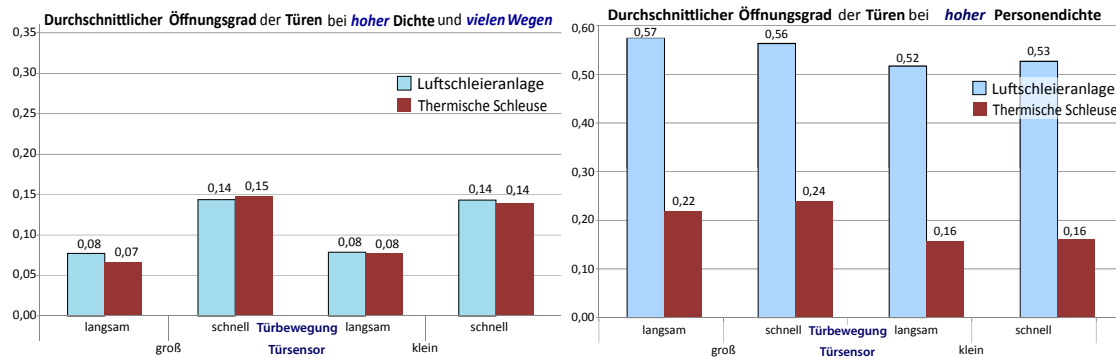


Abbildung 7.14: Türöffnungsgrad bei vielen Wegen / bei Luftschleieranlage

Ein weiterer Indikator für den Energieverbrauch durch die Türanlage selbst ist die Zeit, in der sie sich insgesamt in Bewegung befindet. In Abbildung 7.15 ist die mittlere Zeitdauer bei allen Simulationen auf 100% gesetzt, die Varianten werden relativ miteinander verglichen. Dabei zeigt sich, daß die Größe des Sensorfeldes nur bei hoher Personendichte relevant ist. Bewegen sich die Türen mit einer niedrigen Geschwindigkeit, sind sie dafür häufiger in Bewegung. Bei der Bestandsvariante mit den Luftschleieranlagen sind die vorhandenen Türen durchschnittlich etwas häufiger in Bewegung als in der Variante mit der thermischen Schleuse. Da es jedoch nur halb so viele Türen gibt wie in der Schleuse, finden insgesamt deutlich weniger Türenbewegungen statt.

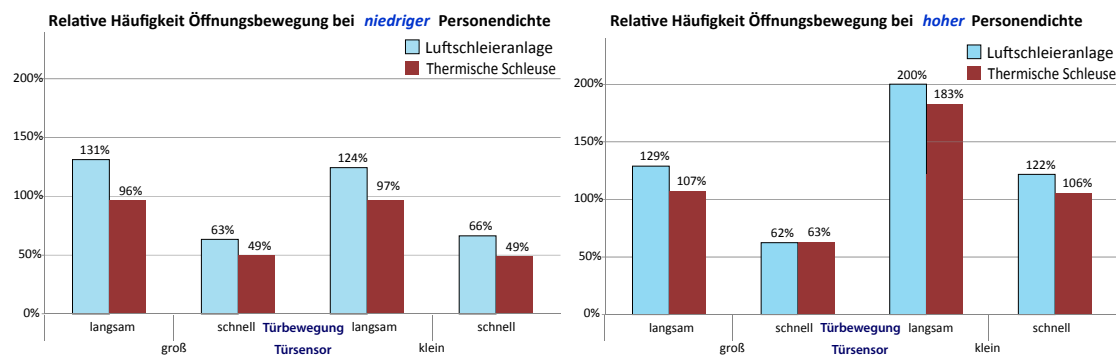


Abbildung 7.15: Relative Häufigkeit von Öffnungs- bzw. Schließbewegungen von Türen

Eine weitere Kenngröße ist die Häufigkeit, mit der die Türen im simulierten Zeitabschnitt ge-

öffnet⁴⁷ oder geschlossen⁴⁸ sind. Bei einer geringen Personendichte haben die betrachteten Parameter keinen Einfluß auf die Kenngrößen⁴⁹. Abbildung 7.16 links zeigt jedoch, daß bei hoher Personendichte die Größe der Sensorfelder einen Einfluß auf die Anzahl der Öffnungsvorgänge hat. Rechts ist zu sehen, daß bei niedriger Personendichte keiner der Parameter einen Einfluß auf die Häufigkeit des geschlossenen Zustandes hat.

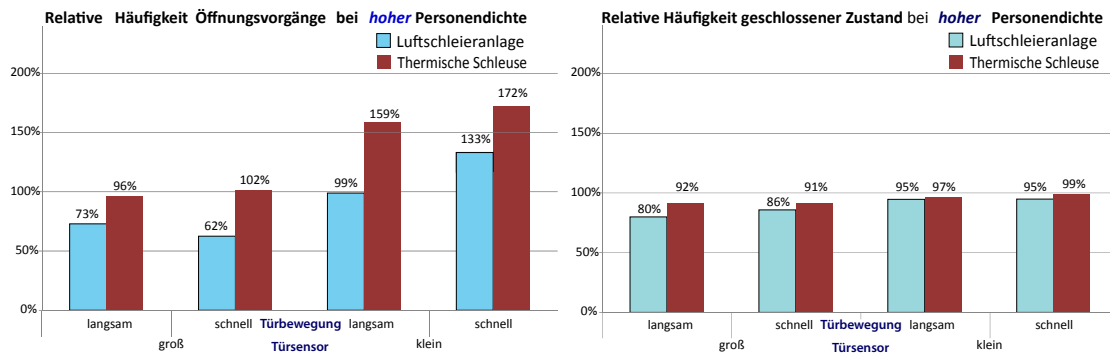


Abbildung 7.16: Häufigkeit Schließ- und Öffnungsvorgänge sowie geschlossener Zustand

7.6.2 Thermischer Komfort

Bezogen auf den thermischen Komfort sind vor allem die Übergänge zwischen den Klimazonen interessant, da die thermischen Verhältnisse innerhalb einer Zone in dieser Modellierung weitgehend konstant sind. Sie werden dort nur durch den Metabolismus und den gegenseitigen Strahlungsaustausch der sich bewegenden Personen leicht verändert. Diskomfort wegen Zugluft und Strahlungsasymmetrie⁵⁰ werden in diesem Modell vernachlässigt, da die simulierten Personen in ständiger Bewegung sind.

Abbildung 7.17 zeigt zwei Varianten nach 10 Sekunden simulierter Zeit. Links ist die Variante *Thermische Schleuse* im Sommer dargestellt, rechts die Variante *Luftschleieranlagen* im Winter. Die Farbe der kleinen Kreise, welche die Personen symbolisieren, gibt Auskunft über den gegenwärtigen PMV-Wert. Die größeren Kreise entsprechen den in Abschnitt 7.3.1 vorgestellten Eigenschaften Intimitäts-, Reaktions- und Wahrnehmungsradius⁵¹ und sind hier nur informativ dargestellt.

Die folgenden Grafiken zeigen, wie sich die Werte PMV und δPMV ⁵² im Laufe der Bewegung von Personen entwickeln, und welchen Minimal-, Maximal- und Mittelwert sie dabei annehmen. Gezeigt wird der Monitor von zwei Personen, die zusammen mit zehn weiteren Personen in verschiedenen Varianten simuliert wurden. Die grün dargestellte Person bewegt sich von außen in

⁴⁷Öffnungsgrad > 70%

⁴⁸Öffnungsgrad < 15%

⁴⁹nicht graphisch dargestellt

⁵⁰vergleiche Abschnitt 3.6.4

⁵¹Reihenfolge in aufsteigender Größe

⁵²Veränderung, also 1. Ableitung nach der Zeit

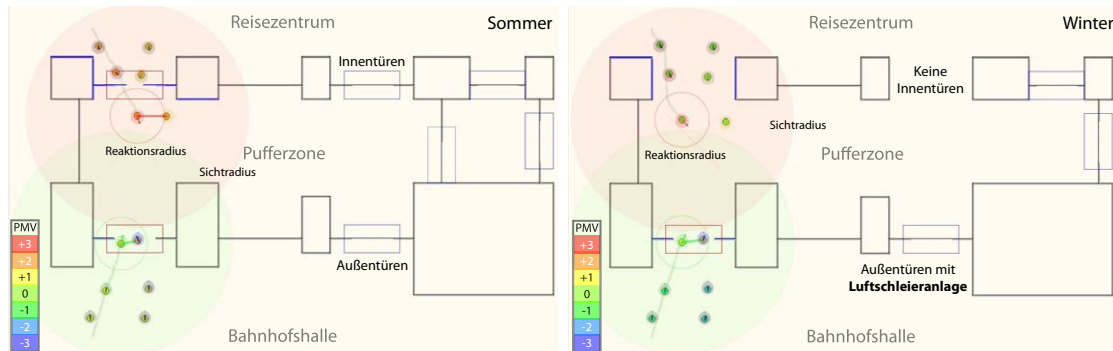


Abbildung 7.17: Thermischer Komfort an den Zugängen zum Reisezentrum

die Pufferzone, die rot dargestellte Person vom Reisezentrum über die Pufferzone nach außen. Beide Personen durchschreiten jeweils genau einmal eine Außentür.

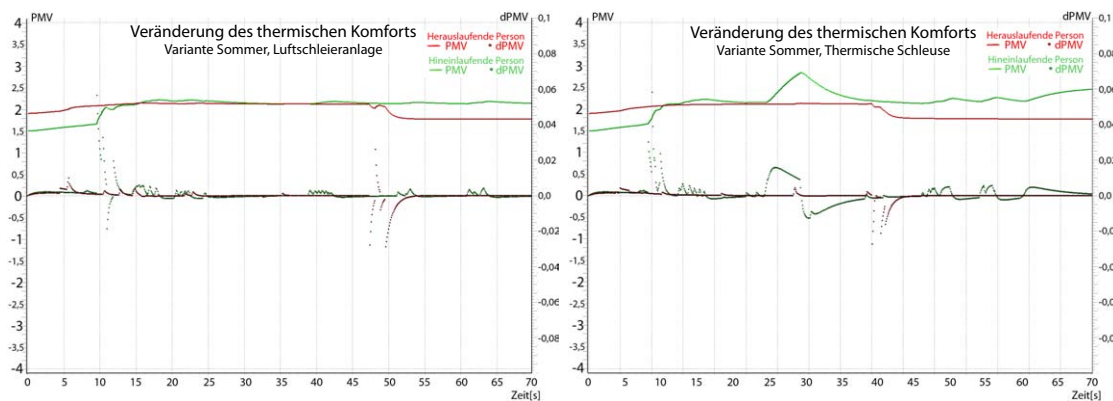


Abbildung 7.18: Verlauf des thermischen Komforts im Sommer

Abbildung 7.18 zeigt die Entwicklung des PMV-Wertes für die beiden simulierten Personen im Sommer. Bei der Variante „Luftschleieranlage“ links scheint es beiden Personen zu warm zu sein. Auf der rechten Seite sieht der Komfortverlauf der aus dem Reisezentrum kommenden Person ähnlich aus. Die in entgegengesetzter Richtung laufende Person ist hier jedoch bereits unangenehm Wärme ausgesetzt. Die maximale Veränderung des PMV-Wertes in $\delta t = 0,1$ Sekunden beträgt bei beiden Varianten $\delta PMV = 0,05$.

Im Winter ist es den Personen außerhalb der Pufferzone zu kalt, im Innern des Reisezentrums zu warm. Die Luftschleieranlage verursacht hier starke Schwankungen des PMV-Wertes mit $\delta PMV > 0,1$ in $\delta t = 0,1s$. Die Variante „Thermische Schleuse“ wäre also im Gegensatz zum Sommer im Winter eindeutig vorzuziehen, siehe Abbildung 7.19.

Während die Abbildungen 7.18 und 7.19 jeweils nur einen Simulationslauf widerspiegeln, zeigen die Abbildungen 7.20 und 7.21 statistische Zusammenfassungen aller Simulationsläufe. Auch hier zeigt sich, daß im Sommer das Temperaturniveau insgesamt zu hoch ist, die thermischen Veränderungen jedoch vergleichsweise gering sind. Im Winter sind die Veränderungen des PMV-Wertes

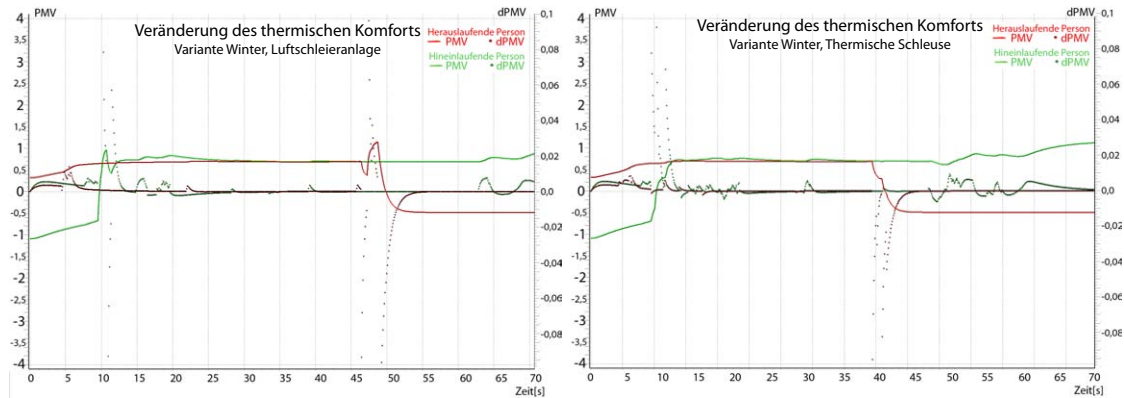


Abbildung 7.19: Verlauf des thermischen Komforts im Winter

deutlich stärker. Bei der Variante mit Luftschleieranlagen treten signifikante Änderungen in beide Richtungen auf und erzielen einen Effekt wie thermische Wechselduschen.

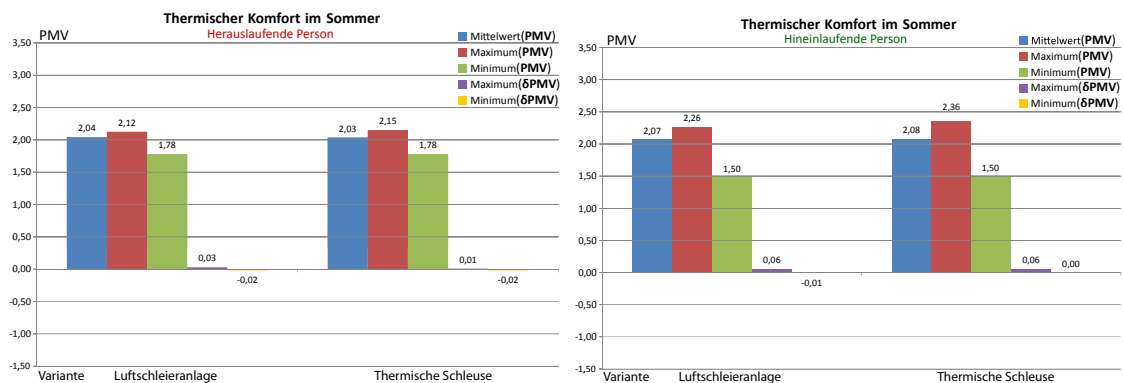


Abbildung 7.20: Durchschnittliche und extreme PMV-Werte im Sommer

7.6.3 Hektik und Enge

In Abbildung 7.22 sieht man, daß die unterschiedlichen Varianten praktisch keinen Einfluß auf die durchschnittliche und maximale Hektik der simulierten Personen haben. Auch die Werte für Enge ähneln einander. Lediglich die Geschwindigkeit der Türen hat einen signifikanten Einfluß auf das durchschnittliche Engegefühl, insbesondere bei geringer Personendichte und kleinen Türsensoren.

In Abbildung 7.23 wird aber deutlich, daß die unterschiedlichen Varianten einen starken Einfluß darauf haben, wann und wie oft extreme Streß-Erscheinungen auftreten. Bei den hier gezeigten Simulationen betrifft das vor allem die grün dargestellte Person, die in das Reisezentrum hineinläuft. Sie gerät in beiden Varianten am Ende in starke Hektik⁵³, in der Variante mit der thermischen Schleuse stellt sich dieses Empfinden plötzlich ein, während sich beim Durchschreiten

⁵³ dunkle Linie

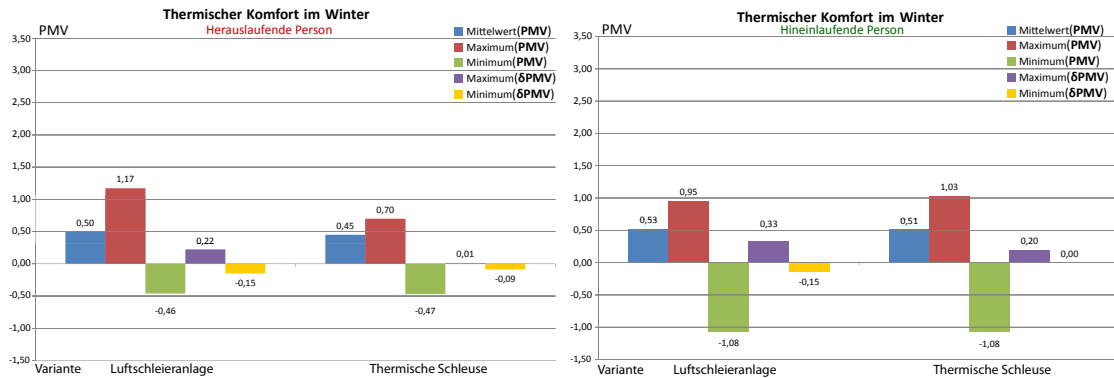


Abbildung 7.21: Durchschnittliche und extreme PMV-Werte im Winter

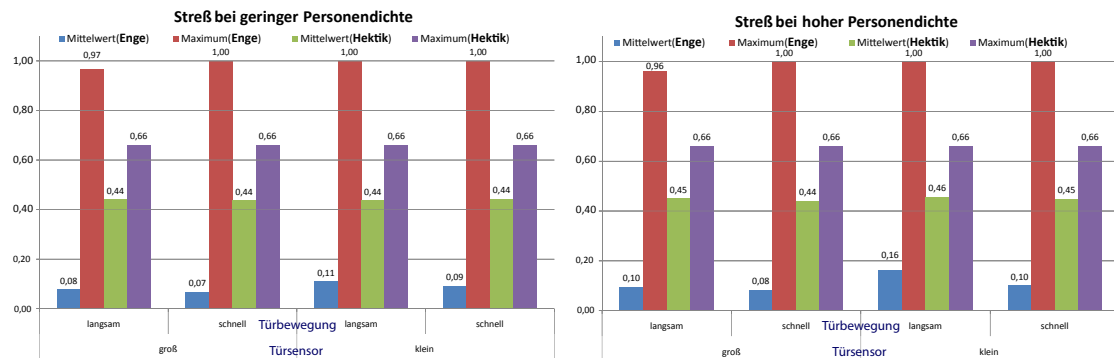


Abbildung 7.22: Numerisch simuliertes Streß-Empfinden bei den verschiedenen Varianten

der Innentür bereits im Vorfeld ein Gefühl von Hektik ankündigt. Die Verteilung von starkem Engegefühl⁵⁴ variiert im Gegensatz dazu stärker bei der rot dargestellten Person, welche das Reisezentrum verläßt.

Weitere Indikatoren für die Wahrscheinlichkeit von Hektik im Verlauf einer Personenbewegung im Bahnhof sind die Gesamtwegstrecke und die dafür benötigte Zeit. Eine lange Gesamtwegstrecke bedeutet, daß die Personen zahlreiche Umwege laufen oder Ausweichmanöver vollführen mußte, um ans Ziel zu gelangen. Eine vergleichsweise hohe Dauer für die Strecke deutet auf Wartezeiten an Türen oder bei entgegen- bzw. querlaufende Personen hin. Bei den hier vorgestellten Simulationen variierten Wegstrecke, Dauer der Bewegung und damit auch die durchschnittliche Geschwindigkeit vor allem mit der Personendichte und der Anzahl der Routen und Richtungen, weniger mit den in Abschnitt 7.5 aufgeführten Parametern.

⁵⁴hell und gestrichelt dargestellt

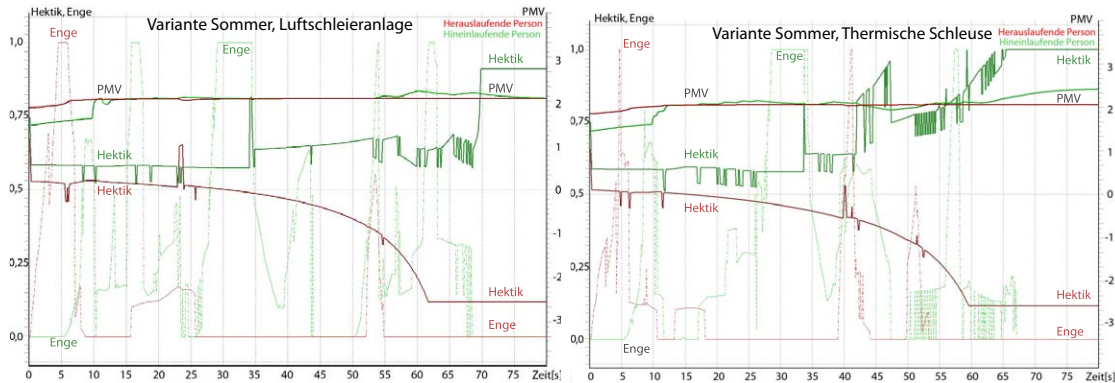


Abbildung 7.23: Veränderung der Stressoren im Verlauf der Zeit

7.7 Auswertung und Diskussion

Die Simulationsergebnisse zeigen, daß die Konfiguration von Türen, beispielsweise durch die Variation der Türgeschwindigkeit und der Größe der Sensorfläche, aber auch durch die Ausbildung von thermischen Schleusen und die Kombination mit Luftschleieranlagen einen starken Einfluß auf das Empfinden von Streß seitens der sich bewegenden Personen hat. Dieser Streß kann durch thermische Einflüsse, Hektik oder räumliche Enge hervorgerufen werden.

Es zeigt sich aber auch, daß es keine pauschale beste Lösung für alle Situationen gibt. Die Antwort auf die Frage, welche Ausprägung die oben genannten Parameter haben sollten, hängt vor allem von der Personendichte und damit von der Tageszeit und vom Wochentag sowie vom Außenklima und damit von der Jahreszeit ab.

Die Ergebnisse der Berechnung von Wegstrecken und der dafür benötigten Zeiten seitens sich bewegender Personen sowie die Simulationen von Türzuständen und -bewegungen besitzen einen quantitativ auswertbaren Charakter. Die berechneten Werte für klimatischen Komfort, Hektik und Enge sind jedoch rein qualitativ zu beurteilen, da ihre Berechnungsmodelle auf Annahmen und nicht auf statistischen Erhebungen beruhen.

Folgende Aspekte der Personenbewegung in Bahnhöfen sind bisher noch nicht berücksichtigt worden, um den Umfang dieser Arbeit nicht zu sprengen, wären aber zusätzlich implementierbar:

- Automatische Berechnung des groben Routenverlaufs vor der eigentlichen Bewegung. Dieser Algorithmus würde auch während der Simulation Anwendung finden, wenn Personen aufgrund von Ausweichbewegungen den Sichtkontakt zum nächsten Etappenziel verlieren
- Höflichkeit, Durchlassen von Querverkehr
- Sehr langes Warten / Anstehen, z.B. im Reisezentrum, am ServicePoint, auf dem Bahnsteig
- Besondere Interaktion *aktiver* Personen mit *inaktiven*, d.h. wartenden Personen
- Vertikale Bewegung auf Treppen und in Fahrstühlen
- Änderung des Wertes für Hektik bei Informationsgewinn, z.B. bei Anzeige der verspäteten Abfahrt eines Zuges
- Differenzierung zwischen dem Einfluß von Personen und Wänden auf das Enge-Gefühl
- Personenbewegung mit sperrigem Gepäck

Hinzu kommen folgende Vereinfachungen bei der Beurteilung des thermischen Komforts:

- Keine zugrundliegende Erhebung für einen PMV-Wert in instationären thermischen Verhältnissen
- Vernachlässigung des Diskomforts bei sprunghaftem Anstieg der relativen Luftfeuchte⁵⁵
- Vernachlässigung des Zugluftrisikos, insbesondere für Personen mit langer Aufenthaltsdauer
- Die klimatischen Zustände in den Modell-Klimazonen sind zeitlich und räumlich konstant

Die in [127] vorgeschlagene Rekursionstiefe von 20 Stufen ist in diesem Modell völlig unrealistisch, da die Rechenzeit exponentiell mit der Tiefe steigt und ab 8 Stufen inakzeptabel ist. Dieser Effekt wird jedoch dadurch kompensiert, daß mit zunehmender Tiefe, d.h. in einer ungewissen Annahme über die Zukunft, mit einer größeren Unschärfe gerechnet wird, was Vorteile in der Berechnungsgeschwindigkeit bringt.

Abschließend läßt sich sagen, daß das in diesem Kapitel vorgestellte Modell am geeignetsten dazu ist, alle drei in dieser Arbeit untersuchten Aspekte *Energieeffizienz*, *Komfort* und *Funktionalität des Bahnhofs* gemeinsam zu untersuchen und durch die Wahl geeigneter Varianten zu optimieren bzw. den verschiedenen dynamisch auftretenden Randbedingungen anzupassen. Allerdings ist das Modell aufgrund der vielen Annahmen nicht unabhängig von den anderen in dieser Arbeit vorgestellten Modellen aussagefähig. Vielmehr benötigt es die in Kapitel 4 vorgestellten statistischen Modelle für eine präzise Berechnung thermischer Randbedingungen, die in Kapitel 6 vorgestellten Strömungssimulationen für eine räumliche Differenzierung insbesondere der Luftgeschwindigkeiten und -turbulenzen und die im selben Kapitel beschriebenen thermischen Simulationen für die quantitativ verwertbare Berechnung des Energieverbrauchs in den Varianten. Die Strukturanalysen aus Kapitel 2 dienen dazu, die Erkenntnisse aus einem Bahnhofmodell auf strukturgleiche Bahnhöfe übertragen zu können.

Fazit

Der Schwerpunkt dieses und des 5. Kapitels liegt in der Entwicklung und Darstellung von maßgeschneiderten numerischen Modellen für funktionale Problemstellungen in der Architektur. Am Beispiel der Personenbahnhöfe wird gezeigt, daß es mit einem gewissen Aufwand möglich ist, den Betrieb und die funktionalen Ansprüche eines Gebäudes derart in mathematische Formeln zu übersetzen, sodaß durch die dynamische Simulation von Varianten Entscheidungen in der Planung von Bauwerken und technischen Anlagen möglich sind, die ohne numerische Verfahren oder mit allgemeinen Softwareprodukten nicht zu realisieren sind.

Es stellt sich natürlich die Frage nach der Angemessenheit des Aufwands. Bahnhöfe besitzen durch ihre große Anzahl und die in Kapitel 2 dargestellten strukturellen Verwandtschaften eine ausreichend große Multiplikatorfunktion, um die einmalige mathematische und mehrfache Datenmodellierung zu rechtfertigen. Nicht zuletzt ließen sich die Erkenntnisse über Personenbewegungen im Normalbetrieb mit gewissen Modifikationen auf die Simulation von Fluchtwegen in Notsituationen übertragen.

⁵⁵vergleiche Abschnitt 3.3.2 und Abschnitt 3.6.4

8 Diskussion

Die Untersuchungen in dieser Arbeit umfassen sowohl qualitative Ansätze in den Kapiteln 1 bis 3 als auch numerisch quantitative Methoden in den Kapiteln 4 bis 7. Während sich die qualitativen Analysen auf die Gesamtheit aller Bahnhöfe beziehen, werden bei den quantitativen Simulationen beispielhafte Objekte modelliert und ausgewertet. Die numerischen Simulationen liefern Informationen über indirekte und Wechselwirkungen in Systemen, zum Teil sogar physikalisch und ökonomisch *meßbare* Ergebnisse. Insofern bieten numerische Modelle Möglichkeiten, Planung und Betrieb von Bauwerken zu optimieren, die mit rein analytischen Methoden nicht zu erreichen sind.

Innerhalb der Kapitel über numerische und quantitative Verfahren gibt es verschiedene Schwerpunkte: Während für die thermischen und strömungsmechanischen Simulationen in Kapitel 6 bereits entwickelte und erprobte Softwarepakete eingesetzt werden, und die Simulationsergebnisse im Vordergrund stehen, wird in den Kapiteln 5 und 7 nachgewiesen, daß es möglich und sinnvoll ist, spezielle numerische Modelle für individuelle Fragestellungen zu entwickeln und zu implementieren. Der Vorteil der numerischen Modelle besteht darin, daß der komplexe Teil der Arbeit, die mathematische Modellierung, nur einmal durchgeführt und kalibriert werden muß, während der einfache Teil, die Erstellung der Datenmodelle, reine Fleißarbeit bedeutet. Die statistische Analyse in Kapitel 4 nimmt eine Sonderrolle ein, da hier zwar vorhandene Regressionsalgorithmen aus dem Statistik-Paket „R“ genutzt werden, aufgrund der Wahl der Parameter und des R-Codes jedoch ebenfalls wiederverwendbare Modelle entwickelt werden. Außerdem werden nur in diesem Kapitel Meßdaten quantitativ ausgewertet und nicht durch Annahmen ergänzt.

8.1 Bewertung der Untersuchungen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchungen anhand der vier zentralen Fragestellungen aus Abschnitt 1.6 diskutiert.

1. Welche sind die für die Energieeffizienz, thermischen Komfort und Funktionalität eines Personenbahnhofes relevanten / kritischen Größen? Als vorrangig kritische Größe für den thermischen Komfort sind natürlich die Personen zu nennen, die den thermischen Zustand in Bahnhöfen zu spüren bekommen. Als weitere kritische Größe sind gemäß Kapitel 5 die Entscheidungsträger zu nennen, welche die Prioritäten in der Planung, Betrieb und Ausstattung von Bahnhöfen setzen. Wie diese Arbeit zeigt, ist selbst die Auswahl oder Entwicklung geeigneter Werkzeuge ein wichtiges Kriterium dafür, ob die drei grundlegenden Zielgrößen in ein annähernd optimales Verhältnis zueinander gebracht werden können.

Es gibt auch physikalische Größen, welche eine hohe Relevanz besitzen, wie beispielsweise die Ausgestaltung von Zonengrenzen und -übergängen sowie technische Anlagen. Dabei ist aber vor allem folgende Größe nicht zu vernachlässigen: die *Zeit*.

Sowohl Uhrzeit und Jahreszeit als auch Aufenthaltsdauer von Personen sind entscheidend für die Anforderungen an Komfort und Funktionalität. Nicht zuletzt werden sich auch die funktionalen Anforderungen eines Bahnhofs im Laufe der Zeit verändern, sodaß in vielen Fällen alte Bausubstanz, Denkmalschutz und neue Funktionen im Widerspruch zueinander stehen.

Die wichtigsten Variablen zur Modellierung von Bahnhöfen unter den Gesichtspunkten Behaglichkeit und Energieeffizienz sind in Abbildung 8.1 dargestellt.

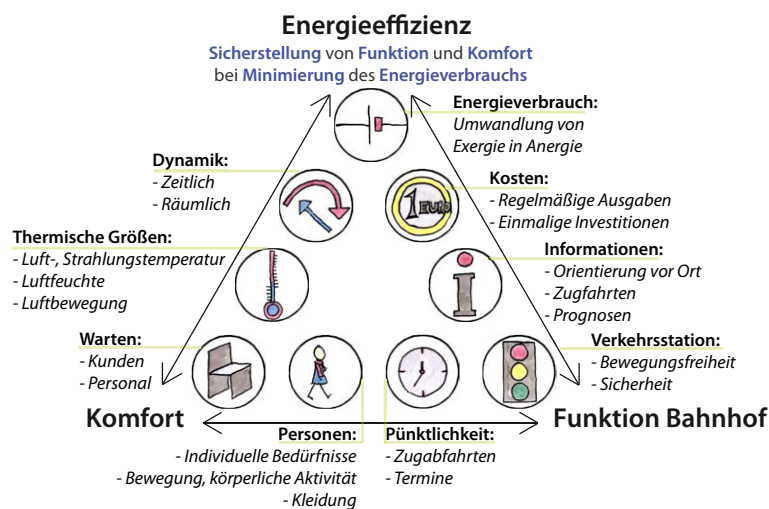


Abbildung 8.1: Relevante Größen hinsichtlich Komfort und Energieeffizienz in Bahnhöfen

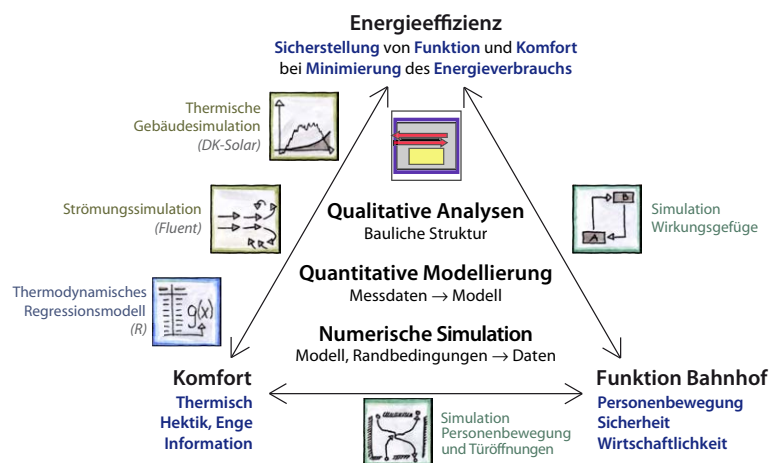


Abbildung 8.2: Numerische und quantitative Werkzeuge zur Modellierung von Bahnhöfen

2. Inwieweit lassen sich diese Größen mit Hilfe von quantitativ statistischen und numerischen Simulationsmethoden optimieren? Es stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, um wichtige Einflußgrößen der Energieeffizienz und der Behaglichkeit in Bahnhöfen zu simulieren. Bisher gibt es allerdings kein numerisches Werkzeug, welches *alle* in dieser Arbeit dargestellten Funktionen vereinen und *gleichzeitig* berechnen könnte. Die Nutzung des in Kapitel 5 dargestellten Simulationswerkzeuges für dynamische Wirkungsgefüge hilft, sich vor Beginn der Planung und vor der Erstellung quantitativer Modelle über die Auswahl, Rolle und Vernetzung der relevanten Variablen im Klaren zu sein.

Die physikalischen Simulationen in dieser Arbeit werden an beispielhaften Objekten durchgeführt, sodaß nur Tendenzen, aber keine quantitativen Resultate verallgemeinerbar sind. Gemäß der Einteilung in Abschnitt 3.6.3 wurden in der Arbeit „nur“ Simulationen, aber keine Optimierungen vorgestellt. Bei einer Optimierung würde ein Algorithmus selbständig die Simulationsparameter so lange variieren, bis sich ein optimales Ergebnis¹ einstellt.

Die in dieser Arbeit verwendeten Analysewerkzeuge werden zusammengefaßt in Abbildung 8.2 dargestellt.

3. Welche allgemeine Aussagen über die Optimierung der Energieeffizienz von Personenbahnhöfen lassen sich aufgrund der Ergebnisse der beispielhaften Analysen in dieser Arbeit treffen? Personenbahnhöfe sind dynamische Systeme, die sich hinsichtlich der Vorhaltung von thermischem Komfort unter anderem an Verkehrsaufkommen, Verweildauer der Reisenden und Außenklima verändern sollten. Die bestimmenden Zustandsgrößen sind jedoch nicht völlig zufällig, sondern mit den in Kapitel 4 dargestellten statistischen Modellen gut vorherbestimmbar. Die Zuverlässigkeit der statistischen Vorhersagen ist jedoch davon abhängig, ob regelmäßig belastbare Messungen hinsichtlich Verkehrsaufkommen, Reisendenbewegung und meteorologischen Einflüssen durchgeführt werden.

Somit lassen sich die vorgestellten numerischen und quantitativen Verfahren nutzbringend im Betrieb und in der Planung von Bahnhöfen einsetzen. Im Betrieb können Prognose- und Simulationsverfahren dazu eingesetzt werden, betriebliche und thermische Zustände fortlaufend zu prognostizieren und die Durchlässigkeit der Zonengrenzen entsprechend zu verändern. Außerdem können Jahressimulationen eine wertvolle Unterstützung für das Energiecontrolling darstellen. Bei der Planung von Neu- und Umbauten kann die Simulation alternativer Varianten dazu genutzt werden, per „Versuch und Irrtum“ zu optimalen Lösungen zu gelangen. Außerdem können bereits im Entwurfsstadium Extremzustände überprüft und mit Hilfe von Simulationsergebnissen die Kommunikation der Planungsbeteiligten unterstützt werden.

Gemäß der Unterteilung in Abschnitt 3.4 handelt es sich bei den Untersuchungen tatsächlich um Maßnahmen zur Steigerung der *Energieeffizienz*. Der Aspekt der *Substitution* der verwendeten Energieträger durch erneuerbare Energien wird in dieser Arbeit nicht diskutiert. *Suffizienz* beschreibt am ehesten den Zustand in vielen kleinen Bestandsbahnhöfen, in denen sowohl auf thermischen Komfort als auch auf Energieverbrauch verzichtet wird.

¹in der Regel ein numerischer Extremwert; Hoch- oder Tiefpunkt

4. Welche Fragen bleiben offen, wo sollten verallgemeinernde oder vereinfachende Annahmen verifiziert werden? Die in dieser Arbeit vorgestellten Analysen und Ergebnisse geben die Möglichkeit zu weiterführenden Forschungsprojekten. Entwicklungspotential gibt es vor allem auf drei Ebenen:

1. Der in dieser Arbeit verwendete PMV-Index[8] ist von Fanger für stationäre Verhältnisse in geschlossenen Räumen entwickelt worden. Daher kann er hier nur zu qualitativen Aussagen verwendet werden. Ein neues Forschungsgebiet wäre daher die Entwicklung eines Komfortmodells für dynamische Verhältnisse, unterstützt durch entsprechende Erhebungen in Bahnhöfen oder anderen offenen Bauwerken. Diese Erhebungen könnten die Komfortaspekte Enge und Hektik sowie visueller und akustischer Informationsgewinn mit einschließen.
2. Die einzelnen quantitativen und numerischen Modelle² könnten numerisch miteinander verknüpft werden, sodaß ganzheitliche Simulationen und numerische Optimierungen gemäß Abschnitt 3.6.3 möglich wären. Das Werkzeug, welches die einzelnen Simulationsverfahren verknüpft und steuert, könnte aus dem in Kapitel 5 vorgestellten Modell für Wirkungsgefüge hervorgehen.
3. Nicht zuletzt wäre es nötig und sinnvoll, neuartige dynamische Zonengrenzen zu entwerfen und zu entwickeln. Diese sollten hohe architektonische Qualitäten besitzen und unter den Gesichtspunkten des Maschinenbaus innovativ sein. Dynamische Zonengrenzen sollten durch ihre Beweglichkeit und Anpassungsfähigkeit den in gewissen Situationen herrschenden Widerspruch begegnen, möglichst durchlässig für Personen zu sein, jedoch möglichst undurchlässig für Luftzug und Wärmeenergie.

8.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellten und entwickelten Verfahren geben einen Anstoß dazu, architektonische Planung und mathematische Modellierung miteinander zu kombinieren und gemeinsam zu nutzen. Am Beispiel der Personenbahnhöfe wurde gezeigt, daß es mit diesen Werkzeugen möglich ist, sowohl qualitative als auch quantitative Ergebnisse zu erzielen, die Planern und Betreibern hilfreiche Informationen zur Optimierung der drei grundlegenden Zielgrößen Energieeffizienz, thermischer Komfort und Funktionalität von Verkehrsgebäuden geben.

Durch die Kombination von

- numerischen und quantitativen Modellen,
- technischen Anlagen³ sowie
- optimalen architektonischen Lösungen⁴

ist es möglich, eine neue Form von *dynamischer Architektur* zu schaffen.

²hinsichtlich thermodynamischer und strömungsmechanischer Größen sowie der Bewegung von Personen und Türen in Bahnhöfen

³insbesondere im Bereich der Grenzen zwischen Raum- und Klimazonen

⁴für Verkehrsgebäude

Abbildungsverzeichnis

1	Relevante Größen hinsichtlich Komfort und Energieeffizienz in Bahnhöfen	iii
2	Numerische und quantitative Werkzeuge zur Modellierung von Bahnhöfen	iv
3	Relevant parameters for optimization of energy efficiency, comfort and functionality	v
4	Numerical und cuantitative tools for modeling railway stations	vi
5	Cantidades relevantes en cuanto a confort y uso eficiente de la energía en estaciones	vii
6	Herramientas numéricas a cuantitatives para la modelación de estaciones de tren .	viii
7	Données agissant sur le confort et l'efficience énergétique des gares	ix
8	Outils numériques et quantitatifs pour la modélisation des gares	x
1.1	Zonen und Funktionen in einem Personenbahnhof	3
1.2	Personengruppen in Bahnhöfen	4
1.3	Sicherheitsrelevante Aspekte eines Bahnhofs	5
1.4	Typische Reisendenzahlen am Darmstädter Hbf	7
1.5	Anteile am deutschen Personenverkehr 2001 [85]	8
1.6	Mobilitätskette [84]	8
1.7	Einsatz von Primärenergie bei der DB AG[37]	11
1.8	Einsatz von Primärenergie für stationäre Prozesse[37]	11
1.9	Untersuchung von Energieeffizienz, Komfort und Funktionalität in Bahnhöfen . . .	13
2.1	Kopf- und Durchgangsbahnhöfe	15
2.2	Vertikale Strukturvarianten	15
2.3	Varianten der Gebäudezonierung und -hülle	16
2.4	Auswirkungen von Wind und Niederschlag	16
2.5	Auswirkungen der Gebäudestruktur auf Energieverbrauch und Funktionalität . . .	19
2.6	Varianten der Wegeführung zwischen Empfangsgebäude und Bahnsteigen	20
2.7	Aufwand für den Wechsel des Höhenniveaus in Abhängigkeit der Wegeführung . .	20
2.8	Technische und bauliche Anlagen für Ebenenwechsel in Bahnhöfen	20
2.9	Zwei Varianten bezüglich der energetischen und klimatischen Zonierung	22
2.10	Raumzonen und ihre Anforderungen durch verschiedene Nutzer	23
2.11	Varianten der horizontalen Trennung von Gebäudezonen	24
2.12	Kompensation der Funktion technischer Anlagen durch bauliche Lösungen	25
2.13	Erzeugung spezieller Wärmeniveaus in Raumzonen in Bahnhöfen	26
2.14	Anzahl der Bahnhöfe unter verkehrs- und vermarktungsrelevanten Aspekten	27
2.15	Relative und absolute Verteilung der Größe „Anzahl Bahnsteige pro Bahnhof“ . .	28

2.16	Relative und absolute Verteilung der Größe „Anzahl Reisende pro Bahnhof“	29
2.17	Anzahl Reisende nach Kategorien Verkehrsstation und Vermarktung	29
2.18	Vergleich Reisendenzahlen und Bahnsteige pro Station	30
2.19	Durchschnittliche Größe der Raumzonen nach Kategorie Verkehrsstation	30
2.20	Anzahl Zughalte nach Zuggattung und Bahnhofskategorie	30
2.21	Anzahl und relativer Anteil der Bahnhöfe <i>mit</i> und <i>ohne</i> Empfangsgebäude	31
2.22	Verteilung der Varianten Zugbetrieb der Bahnhöfe Kategorie 1-3	31
2.23	Verteilung der Varianten Horizontale Struktur der Bahnhöfe Kategorie 1-3	33
2.24	Position der Gleise und des Empfangsgebäudes bezogen auf die Geländekante	34
2.25	Transparenz der Hülle der Empfangs- und Bahnsteighalle	34
2.26	Wetter- und thermischer Schutz bei Bahnhöfen	35
2.27	Wegeführung zwischen Empfangsgebäude und Bahnsteigen	35
2.28	Technische und bauliche Anlagen zur Überwindung von Höhendifferenzen	36
3.1	Diskomfortpyramide nach Krist	41
3.2	Schematische Darstellung des Kano-Modells[109]	42
3.3	Kosten und Nutzen von komfortsteigernden Maßnahmen	44
3.4	Mobilitätskette im Flugverkehr	49
3.5	Matrix der Einflußfaktoren	52
3.6	Komfort bei Personenkraftwagen	53
3.7	Komfortmerkmale von Automobilen beeinflussen Kaufentscheidungen	55
3.8	Parametervergleich zu Komfort bei unterschiedlichen Verkehrsmitteln	56
3.9	Körpereigene Regelung des Wärmehaushaltes [22]	60
3.10	Thermische Behaglichkeit bei sitzender Beschäftigung, mittlerer Aktivität und entsprechend angepaßter Bekleidung [93]	62
3.11	Thermische Behaglichkeit	62
3.12	Komfort, abhängig von Luftgeschwindigkeit und -temperatur [79]	67
3.13	Vergleich von turbulenter und laminarer Luftgeschwindigkeit	68
3.14	Feedbackmodell der thermischen Behaglichkeit[109]	69
3.15	Funktionen der Fassade bei Gebäuden nach [79]	70
3.16	Mindestnennbeleuchtungsstärken in Bahnhöfen	75
3.17	Einflußgrößen auf den Komfort in Räumen nach [79]	77
3.18	Energiekette und Bewertungsgrößen der Energie in Gebäuden[109]	80
3.19	Energieverbrauch im Frankfurter Flughafen 2002 nach Energieträgern[107]	82
3.20	Mindmap über den Energieverbrauch in Bahnhöfen.	85
3.21	Technische Energieverbraucher in Bahnhöfen	86
3.22	Aus dem Umsetzungsprogramm „Energie in Hochbauten“ der SBB[72]	87
3.23	Werkzeuge im integrierten Planungsprozeß nach [79]	90
3.24	Beziehung von Systemen und Modellen	91
3.25	Die Modellbildung ist ein iterativer Prozeß	92
3.26	Vernetzung von Modellvariablen[80]	93
3.27	Beispiele für selbstverstärkende und stabilisierende Regelkreise	94
3.28	Zusammenhang zwischen PPD und PMV nach P.O. Fanger[92]	97
3.29	Zwei sich ergänzende Simulationsverfahren	106

3.30	Vergleich der Leistungsschwerpunkte beider Systeme	107
3.31	Zielgrößen und Ausgabeformate	107
4.1	Verlauf von Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit	114
4.2	Scatterplot-Matrix für den Vergleich thermischer Zustände an der Wetterstation und auf dem Bahnsteig	115
4.3	Scatterplot-Matrix für den Vergleich thermischer Zustände an der Wetterstation und im ServicePoint	116
4.4	Lagplots der Regressionsanalysen zwischen den Lufttemperaturen in der Wetterstation und am Bahnsteig	117
4.5	Lagplots der Regressionsanalysen zwischen Lufttemperatur in der Wetterstation und relativer Luftfeuchte am Bahnsteig	118
4.6	Lagplots der Regressionsanalysen zwischen Globalstrahlung und Lufttemperatur am Bahnsteig	119
4.7	Lagplots der Regressionsanalysen zwischen Globalstrahlung und relativer Luftfeuchte am Bahnsteig	119
4.8	Übersicht der verzögerten Einflüsse der Temperatur Wetterstation auf die vier repräsentativen Klimazonen im Bahnhof	120
4.9	Regression der Temperaturwerte Bahnsteig an denen der Wetterstation	122
4.10	Diagnostische Graphen des Regressionsmodells für die Bahnsteigtemperatur	123
4.11	Gemessene und berechnete Werte für die Abweichung der Lufttemperatur vom Trend [K]	124
4.12	Regression der Lufttemperatur Empfangshalle an der des Querbahnsteigs	124
4.13	Residuendiagnose Regressionsmodell Lufttemperatur Querbahnsteig	125
4.14	Diagnostische Graphen des Regressionsmodells für die Lufttemperatur in der Empfangshalle	125
4.15	Lagplots des Regressionsmodells für die Lufttemperatur im ServicePoint	127
4.16	Regressionsmodell für den ServicePoint mit Heizung	128
4.17	Schematische Darstellung des Heizprozesses an kalten Tagen im ServicePoint	128
4.18	Uhrzeiten der Tageshöchstwerte Lufttemperatur im ServicePoint	129
4.19	Verlauf der Tageshöchstwerte Lufttemperatur im ServicePoint	129
4.20	XY-Plot der Lufttemperaturen in der Empfangshalle und im ServicePoint nachts zwischen 0 und 6 Uhr	130
4.21	XY-Plot der Lufttemperaturen Empfangshalle / ServicePoint an warmen Tagen	130
4.22	Zuordnung der Temperaturen in der Empfangshalle und im ServicePoint nachts an besonders kalten Tagen	131
4.23	Meß- und Modellwerte der Lufttemperaturen nachts im Empfangsgebäude	131
4.24	Residuendiagnose des Regressionsmodells mit einem Polynom 3. Grades	132
4.25	Residuenplot des quadratischen Modells einer linearen Regression zwischen gemäßigten Hallen- und ServicePointtemperaturen	132
4.26	Wochentemperaturverlauf Meßvergleich 27.03.2008	133
4.27	Wochentemperaturverlauf Meßvergleich 10.04. und 17.04.2008	133
4.28	Wochentemperaturverlauf Meßvergleich 24.04. und 29.05.2008	134
4.29	Wochentemperaturverlauf Meßvergleich 05.06. und 12.06.2008	134

4.30	Wochentemperaturverlauf Meßvergleich 02.07. und 26.11.2008	135
4.31	Wochentemperatur Meßvergleich 04./29.12.2008, 02./04.01.2009	135
4.32	Fehleranalyse: Berechnete und gemessene Werte Lufttemperatur Außenbereiche . .	136
4.33	Fehleranalyse: Berechnete und gemessene Werte Lufttemperatur Innenräume . . .	137
4.34	Berechneter Temperaturverlauf für Verkehrsstation und Empfangsgebäude	137
4.35	Korrektur des berechneten Jahrestemperaturverlaufs	138
4.36	Summenhäufigkeit bestimmter Lufttemperaturen berechnet und korrigiert	138
4.37	Häufigkeit der Stunden pro Jahr mit akzeptablen Lufttemperaturen	139
4.38	Darstellung der Häufigkeit des Eintretens von Komfortzuständen nach DIN EN 15251 im ServicePoint	140
4.39	Darstellung der Häufigkeit des Eintretens von Komfortzuständen am Querbahn- steig und in der Empfangshalle	140
4.40	Lufttemperaturen bei einem typischen Gang durch den Darmstädter Hbf	141
4.41	Räumlich klimatische Situation an einem typischen Sommer- bzw. Wintertag . . .	141
4.42	Räumlich klimatische Situation an einem typischen Tag in der Übergangszeit . . .	142
4.43	Thermischen Unabhängigkeit der Gebäudezonen im Darmstädter Hbf	142
4.44	Vergleich der Temperatursummenhäufigkeiten Empfangshalle Regressionsmodell der Messungen 2005/2008 und Simulation	148
4.45	Verlauf von Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur in 2008 inkl. Trend	149
4.46	Vergleich der stichprobenhaften Messungen am Boden mit den Messungen an der Wetterstation	149
5.1	Definition und Gruppierung der Systemvariablen für Bahnhöfe	152
5.2	Durchschnittliche Bewertung der Variablen von 7 verschiedenen Gruppen	153
5.3	Rollenmodell und Wirkungen der Systemvariablen	153
5.4	Sechs verschiedene Rollenmatrizen im Wirkungsgefüge <i>Personenbahnhof</i>	156
5.5	Aktive, kritische und passive Variablen	156
5.6	Technische Anlagen sind vordergründig die Energieverbraucher in Bahnhöfen . . .	157
5.7	Energieströme und Komfort im Empfangsgebäude	158
5.8	Detailbetrachtung: Energie und Komfort im ServicePoint	159
5.9	Wirkungsgefüge ServicePoint, Variante 1	161
5.10	Wirkungsgefüge ServicePoint, Variante 2	161
5.11	Iterationsschritt einer Variablen im Modell 0. Ordnung	165
5.12	Iterationsschritt einer Variablen im Modell 1. Ordnung	167
5.13	Iterationsschritt einer Variablen im Modell 2. Ordnung	167
5.14	Wirkungsgefüge ServicePoint mit hohem Öffnungsgrad	168
5.15	Endwerte und Steigungsverlauf des ersten Simulationsdurchgangs	169
5.16	Stärkerer Einfluß des Energieverbrauchs und der Betriebskosten	169
5.17	Verhalten eines überwiegend geschlossenen ServicePoints	170
5.18	Endwerte und Steigungen bei einem geschlossenen ServicePoint	170
5.19	ServicePoint mit selbst regelndem Öffnungsgrad	171
5.20	Werte und Steigungen des 1. Simulationsdurchgangs	171
5.21	Stark vernetztes Modell mit niedrigem Öffnungsgrad	173
5.22	Simulationen eines 'billigen' ServicePoints	173

5.23	Simulationen einer Selbstreglung des Öffnungsgrades nach 200 Iterationen	173
5.24	WG/Simulationen einer Selbstreglung des Öffnungsgrades nach 1000 Iterationen .	174
6.1	Aufteilung des Bahnhofs in drei Modelle	175
6.2	Mit DK-Solar und Fluent simulierte Gebäudemodelle	176
6.3	Fotografische Aufnahmen der Verkehrsstation Köln Messe/Deutz	177
6.4	Bahnsteig Köln Messe/Deutz Bestand	177
6.5	Bahnsteig Köln Messe/Deutz Entwurf	178
6.6	Dreizonenmodell des Entwurfs einer gläsernen Bahnsteigeinhausung	178
6.7	Prinzipskizze des Darmstädter Hauptbahnhofs[119]	179
6.8	Skizzenhafte Darstellung des Darmstädter Hbf aus Richtung Norden	179
6.9	Vertikaler Querschnitt des Empfangsgebäudes Darmstadt Hbf	180
6.10	Grundriß des Empfangsgebäudes Darmstadt Hbf	180
6.11	Isometrie des Empfangsgebäudes Darmstadt Hbf	181
6.12	Klimazonen auf Erdgeschoßebene im Empfangsgebäude des Darmstädter Hbf . . .	181
6.13	Räumliche Situation des Reisezentrums im Hauptbahnhof Frankfurt am Main . .	182
6.14	Prinzipskizze der Bestands- und Entwurfsituation des Reisezentrums	182
6.15	Netz eines halben Bahnsteiges in Köln Messe/Deutz	183
6.16	Gerenderte Darstellung des Bahnsteigmodells im Bestand	183
6.17	Gerenderte Darstellung des Netzes der Entwurfsvariante	184
6.18	Gittermodell der Empfangshalle Darmstadt Hbf	184
6.19	Innenraummodell der Empfangshalle Darmstadt Hbf	185
6.20	Foto eines ServicePoints im Bestand	185
6.21	Grundriß des neuen ServicePoints	186
6.22	Gerendertes Netzmodell des ServicePoints	187
6.23	Simulationsvarianten mit DK-Solar für den Bahnsteig in Köln-Deutz	187
6.24	Jahrestemperaturverlauf eines Bahnsteigs in Köln-Deutz ohne aktive Klimatisie- rung [123]	188
6.25	Jahresbilanz passiv - Wärmegewinne und -verluste [MWh/a] [123]	188
6.26	Jahresbilanz passiv pro Person [123]	189
6.27	Jahrestemperaturverlauf mit Heizung [123]	189
6.28	Jahresbilanz aktiv: Wärmegewinne und -verluste [MWh/a] [123]	190
6.29	Jahresbilanz beheizt pro Person [MWh/a] [123]	190
6.30	Wochentemperaturverlauf im Januar mit aktiver Heizung [123]	191
6.31	Wochentemperaturverlauf im Juni [123]	191
6.32	Wochenbilanzen im Januar (links) und Juni (rechts) [123]	192
6.33	Jahrestemperaturverlauf im Passivbetrieb mit und ohne Dämmung [123]	192
6.34	Jahresbilanz im Passivbetrieb mit und ohne Dämmung [123]	193
6.35	Luftströmung im Bestand mit 1m/s aus Richtung Aufgang	194
6.36	Darstellung der Strömungsvektoren in der Y-Ebene	194
6.37	Einströmung aus Richtung Aufgang mit 5m/s	195
6.38	Einströmung in Gegenrichtung mit 5m/s	195
6.39	Einströmung schräg aus Richtung Gleis mit 5m/s	196
6.40	Strömungspfade bei Simulation eines durchfahrenden Triebfahrzeugs	196

6.41	Turbulenzgrade im Nachlauf eines durchfahrenden Triebfahrzeugs	197
6.42	Strömungsverhalten der Entwurfsvariante bei Wind mit $v=1\text{m/s}$	197
6.43	Strömung aus Richtung Aufgang mit $v=5\text{m/s}$	199
6.44	Darstellung der Strömungspfade bei $v=5\text{m/s}$	199
6.45	Darstellung von Strömungsgebieten mit gleicher Turbulenz	200
6.46	Darstellung der Luftströme bei Windstößen aus verschiedenen Richtungen	200
6.47	Geschwindigkeit und Turbulenz im Innenraum bei einer Zugdurchfahrt	201
6.48	Jahrestemperaturverlauf ohne aktive Heizung[124]	203
6.49	Jahrestemperaturverlauf mit aktiver Heizung[124]	203
6.50	Energie- und Temperaturbilanz der Empfangshalle	204
6.51	Jahrestemperaturverlauf nach Sanierung	205
6.52	Varianten der Strömungssimulationen der Empfangshalle Darmstadt Hbf	206
6.53	Temperaturverteilung in der Z-, Y- und $T=20^\circ\text{C}$ -Ebene	207
6.54	Strömungspfade und -geschwindigkeit	207
6.55	Öffnen einer Tür im Zugangsbereich Süd	208
6.56	Öffnen einer zweiten Tür im Zugangsbereich Süd	208
6.57	Turbulenzgrad der Strömung nach 0 und nach 60 Sekunden	209
6.58	Temperaturverteilung nach dem Öffnen einer Tür im Osteingang	209
6.59	Temperaturverteilung und Strömungsgeschwindigkeiten, drei offene Türen	210
6.60	Richtungsvektoren der Strömung vor und beim Öffnen einer Osttür	210
6.61	Richtungsvektoren der Strömung nach dem Öffnen einer Ost- und Südtür	211
6.62	Simulationsvarianten Redesign ServicePoint	214
6.63	Interne Wärmeausbreitung im ServicePoint nach 60 und nach 135 Sekunden	215
6.64	Interne Wärmeausbreitung im ServicePoint nach 30, 60 und 135 Sekunden	215
6.65	Strömungspfade bei einem parallelen Luftstrom mit $v=0,5\text{m/s}$	216
6.66	Darstellung der Temperatur bei einem Windstoß mit 5m/s	216
6.67	Darstellung der Temperatur bei einem Windstoß mit 5m/s	217
6.68	Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit in m/s	217
6.69	Thermisch behagliches Luftgebiet bei einem schrägen Luftstrom von 5m/s	218
6.70	Luftgeschwindigkeiten bei schräger Einströmung	219
6.71	Turbulenzgrade bei schräger Einströmung	219
6.72	Jahrestemperaturverlauf und -energiebedarf Reisezentrum Ffm Hbf im Bestand	221
6.73	Jahrestemperaturverlauf und -energiebedarf Reisezentrum mit Windfang	221
6.74	Energiebilanz der beiden Varianten für das Reisezentrum Frankfurt(M) Hbf	222
7.1	Berechnung der Dichte in der Umgebung einer Person	233
7.2	Bewegungsvarianten in Abhängigkeit der bisherigen Situation einer Person	237
7.3	Wirkungsbilanz und die daraus resultierenden Bewegungsmöglichkeiten	239
7.4	Gegengerichtete Bewegungen	242
7.5	Gleichgerichtete Bewegungen	242
7.6	Prüfung einer möglichen Kollision mit einer Wand	245
7.7	Virtuelle Wandstrecke aus möglichen zukünftigen Positionen einer Person	248
7.8	Transformation des Koordinatensystems und resultierende Bewegung	248
7.9	Bewertung der Lage von Eigen- und Gegenwirkungen	255

7.10	Simulationsszenarien Bewegungsmodell am Beispiel Reisezentrum Frankfurt Hbf .	262
7.11	Räumlich geometrisches Datenmodell	262
7.12	Bewegungsspuren von 2 Personen durch die Pufferzone Reisezentrum FFM	263
7.13	Durchschnittlicher Türöffnungsgrad, abhängig von Türbewegung und -sensor . . .	263
7.14	Türöffnungsgrad bei vielen Wegen / bei Luftschleieranlage	265
7.15	Relative Häufigkeit von Öffnungs- bzw. Schließbewegungen von Türen	265
7.16	Häufigkeit Schließ- und Öffnungsvorgänge sowie geschlossener Zustand	266
7.17	Thermischer Komfort an den Zugängen zum Reisezentrum	267
7.18	Verlauf des thermischen Komforts im Sommer	267
7.19	Verlauf des thermischen Komforts im Winter	268
7.20	Durchschnittliche und extreme PMV-Werte im Sommer	268
7.21	Durchschnittliche und extreme PMV-Werte im Winter	269
7.22	Numerisch simuliertes Streß-Empfinden bei den verschiedenen Varianten	269
7.23	Veränderung der Stressoren im Verlauf der Zeit	270
8.1	Relevante Größen hinsichtlich Komfort und Energieeffizienz in Bahnhöfen	273
8.2	Numerische und quantitative Werkzeuge zur Modellierung von Bahnhöfen	273

Literaturverzeichnis

Bücher und Zeitschriften

- [1] Fraunhofer Institut Solare Systeme: Gebäude und Technische Gebäudeausrüstung, Freiburg 2002
- [2] P. Vink: Comfort and Design - Principles and good practice, CRC Press 2005
- [3] R.Weber, M.A. Bellmann: Optimierung und Modellierung des Flugzeugkabinenkomforts - psychophysikalische Untersuchungen zum Komfort von Flugzeugkabinen, Institut für Physik, Universität Oldenburg, 2007
- [4] Morten Grandt, Anna Bauch: Komfort als Entwicklungskriterium in der Systemgestaltung, Deutsche Gesellschaft für Luft und Raumfahrt (DGLR), 2005
- [5] S. Schlott: Stand- und Zusatzheizung, Verlag moderne Industrie, 1997
- [6] R. Wittmann: Bewertung von Kabinenkonfigurationen für Flugzeuge, Dissertation, Verlag Dr. Hut, 2007
- [7] L.G. Richards: On the psychology of passenger comfort. Human Factors in Transport Research, 1980
- [8] P.O. Fanger: Thermal Comfort, Reprint, Malabar, Fla., Krieger 1982
- [9] R. Schmidt: Abschlußbericht „Thermischer Komfort / Klimatisierung von HS-Zellen“, Eurocopter, 1997
- [10] R. Krist: Modellierung des Sitzkomforts, eine experimentelle Studie, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, Schuch Verlag, 1994
- [11] F. Herzberg, The motivation to work, 2. Auflage New York, Wiley, 1959
- [12] W.-H. Hucho (Herausgeber): Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort, Vieweg Verlag Wiesbaden 2005
- [13] H. Oertel jr.: Prandtl - Führer durch die Strömungslehre, Vieweg Verlag, 11. Auflage 2002
- [14] D. Labuhn, O. Romberg: Keine Panik vor Thermodynamik!, Vieweg Verlag, 2. Auflage 2006
- [15] J. Strybny: Ohne Panik Strömungsmechanik!, Vieweg Verlag, 2. Auflage 2005
- [16] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer: Physik für Ingenieure, Springer Verlag, 9. Auflage 2004

- [17] H. Kuchling: Taschenbuch der Physik, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 17. Auflage 2007
- [18] H. Oertel jr., E. Laurien: Numerische Strömungsmechanik, Vieweg Verlag, 2. Auflage 2003
- [19] H. Oertel jr., M. Böhle, U. Dohrmann: Strömungsmechanik, Vieweg Verlag, 4. Auflage 2006
- [20] K. Langeheinecke(Hrsg.), P. Jany, G. Thieleke: Thermodynamik für Ingenieure, Vieweg Verlag, 6. Auflage 2006
- [21] O. Kempfert: Arbeitsplatz Auto, Frankfurt am Main, 1999
- [22] W. Frank: Raumklima und Thermische Behaglichkeit, Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 1975
- [23] O. Zeidler: Grenzen der thermischen Last bei Fensterlüftung in Bürogebäuden, Hermann-Rietschel-Institut, Berlin 2000
- [24] A. Duval, L. Bischoff: Light Weight Concept four and three layers: a new effective acoustic package family, Faurecia Innenraum Systeme GmbH, Sassenburg, Polyurethan 2007
- [25] E. Lüth: Erstellung der experimentellen und theoretischen Grundlagen zur optimalen Auslegung von Strahlungsheizsystemen für Industriehallen bezüglich Energieverbrauch, Wirtschaftlichkeit und thermischem Komfort, Gaswärme-Institut e.V. Essen, 1986
- [26] W. Richter: Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Heizperiode -Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2003
- [27] F.A. Toudert: Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot Dry Climate, Dissertation, Freiburg, November 2005
- [28] Bundesamt für Konjunkturfragen: Neuer Komfort mit Tageslicht, RAVEL Verlag, 1994
- [29] H. Ruscheweyh: Dynamische Windwirkung an Bauwerken unter Interferenzeinfluss, Bauverlag, Wiesbaden, 1982
- [30] P. Mösele u.a.: GREEN BUILDING, Konzepte für nachhaltige Architektur, Callwey 2007
- [31] C. Meyer: Bewertung thermischer Behaglichkeit mittels Strömungssimulation, Dissertation Universität Kassel, 1999
- [32] K. Spasokukotskiy: Modellgestützte Messung thermodynamischer Größen zur Verbesserung der Behaglichkeit und zur Energieeinsparung in Gebäuden: smarthome Technologie, Berlin, Mensch-und-Buch-Verlag, Dissertation, 2005
- [33] H. Künzel: Bauphysik und Raumklima - Entwicklungen in der Vergangenheit, wksb 57/2006

- [34] Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 03/04, 71. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag, 2003
- [35] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005), Beuth Verlag GmbH, 2006
- [36] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Energieeffizienz - die intelligente Energiequelle, Berlin, 2008
- [37] S. Reck: Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung bei der Deutschen Bahn AG, Dissertation am Fachbereich Maschinenbau, Universität Hannover, 2001
- [38] J. Mayer: Die energiesparsame Bahn, Zeitschrift „Die Deutsche Bahn“, März 1993, S. 217-220
- [39] Th. Weisskopf, U. Kaufmann: Fitness-Programm für unsere Bahnhöfe, Zeitschrift „Schweizer Ingenieur und Architekt“, November 1994, S. 1004 bis 1007.
- [40] J. Kettner: Die Energiereduktion bei der Deutschen Bahn AG - Ziele und Möglichkeiten, Zeitschrift „Schienen der Welt“, Mai 1995, S.50 - 57
- [41] Werbebroschüre der ÖBB: „Öko-Point Meidling - Erster Energie-Musterbahnhof Österreichs“, Cl&M-Prod.-Nr. 3103463, Umweltmanagement, Mai 2003 sowie Gespräch mit C. Dieplinger, ÖBB, 27.10.2003
- [42] S. Berndorfer: Umwelterklärung 2001 Hauptbahnhof Linz, ÖBB - Umweltmanagement, Juni 2002
- [43] Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG) §2 Abs.1 und Abs. 3 , §4 Abs. 1, Fassung von 2003
- [44] Eisenbahn Bau- und Betriebsordnung (EBO) §4 Abs. 1, 2 und 3, Fassung von 2003
- [45] Amstein und Walthert, Cargo Center 2, Frankfurt, Dynamische Gebäudesimulation, Mai 1997
- [46] K. Voss, G. Löhnert, A. Wagner: Energieeffizienz und Solarenergienutzung im Nichtwohnungsbau - Konzepte und Bauten, SolarBau: Monitor, BMWi (BEO) Journal 2000
- [47] W. Feist, G. Hauser, G. Hausladen, A. Lohr, F. Ranft: SolarBau - Teilkonzept 3, Solar optimierte Gebäude mit minimalem Energiebedarf, Freiburg, Oktober 1998
- [48] R. Gonzalo: Energiebewußt Bauen, Edition Erasmus, 1996
- [49] N. Fisch: Integrale Energiekonzepte für den Wohnsiedlungsbau, TU Braunschweig, 2003
- [50] K. Daniels: Grundlagen des ökologischen Bauens, Birkhäuser Verlag Basel, 1995
- [51] K. Daniels: Technologie des ökologischen Bauens, Birkhäuser Verlag Basel, 1999
- [52] S. Plessner, Carsten Bremer, Norbert Fisch: Auf dem Prüfstand, Zeitschrift „Intelligente Architektur“ 09-10 2003, S.52 - S. 55

- [53] Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen: Energieeinsparungsmöglichkeiten im Flughafenbetrieb, Flughafen 23, Stuttgart, Januar 1984
- [54] L. Schulze, Benedikt Siepe: Der Energieverbrauch in öffentlichen Einrichtungen - Bestandsanalyse, Einsparpotentiale, Energiemanagement, S.7 - 18, Niedersächsischer Städtetag, Energieeinsparung in öffentlichen Einrichtungen, Beiträge zur regionalen Entwicklung, Heft Nr. 35, ISSN 0175-5951
- [55] L. Höflich-Häberlein: Energiecontrolling in öffentlichen Einrichtungen - eine Betrachtung unter technisch-wirtschaftlichen Kriterien, S.85- 95, Niedersächsischer Städtetag, Energieeinsparung in öffentlichen Einrichtungen, Beiträge zur regionalen Entwicklung, Heft Nr. 35, ISSN 0175-5951
- [56] U. Römer: Energiekonzept Grundschule Spaden , Gemeinde Schiffdorf, S.31-39, Niedersächsischer Städtetag, Energieeinsparung in öffentlichen Einrichtungen, Beiträge zur regionalen Entwicklung, Heft Nr. 35, ISSN 0175-5951
- [57] G. Beltrani, Ernst Basler und Partner AG Zollikon: Umweltmanagement und Energieeffizienz in Industrie- und Dienstleistungsbetrieben, S145-S.160, Beitrag aus [58], Chur / Schweiz, 2002
- [58] R. Meier, Martin Beck, Pascal Previdoli: Bauen, Sanieren, wirtschaftlich Investieren, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit im Einklang, Verlag Rüegger, ISBN 3 7253 0731 8, www.ewg-bfe.ch, Chur / Rürich 2002,
- [59] M. Kennedy: Energetische Optimierung einer Produktionshalle, Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Juni 1999
- [60] U. Modlinski: Schlußbericht „Entwicklung, Anpassung und Nutzung eines universellen Energie-Management-Systems mit dezentraler Bussteuerung“ in einem energetisch optimierten Gebäude (LEO), Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, ExperTeam AG Dortmund, Juni 1999
- [61] D. Ahrens: Fibel zum ökologischen Bauen, BauWerk Verlag Berlin, 2000
- [62] VDI Bericht 1692: Energetische Bewertung des Bestands, VDI Verlag 2002
- [63] VDI Bericht 1693: Regenerative Energien in der Gebäudetechnik
- [64] VDI Bericht 1587: Energieeinsparung in öffentlichen Liegenschaften
- [65] M. Kruska: Bewertung der Energieeffizienz von Industriebetrieben am Beispiel der Milchverarbeitung, Shaker Verlag, Dissertation RWTH Aachen 2002
- [66] B. Rolfsman: Interaction between Energy Systems of Buildings and Utilities in an ever-changing Environment, Dissertation No. 827, Linköping University, Sweden, 2003
- [67] Energieagentur NRW (Herausgeber), EnergieverSCHwendung? Handbuch zum rationalen Einsatz von elektrischer Energie, Klartext Verlag, Essen 2000
- [68] B. Wick: Energiekennzahlen der häufigsten Gebäudetypen, Auswertung der Energiekennzahl-Erhebung in der Schweiz - Stand Sommer 1983, Bundesamt für Energiewirtschaft, Widen/AG, September 1983

- [69] K. Meyer, B. Wick: Energiekennzahlen von Gebäudegruppen, sia Dokumentation D024, Juni 1988
- [70] H. Gugerli, S. Gasser, E. Füglistner, M. Kunz: Elektrische Energie im Hochbau, Leitfaden für die Anwendung der Empfehlung SIA 380/4, Zürich, April 1996
- [71] Th. Brendel, Gerhard Güttler, Energiekennzahlen im Hochbau, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 83-092, SWD Software Design GmbH Frankfurt am Main, Mai 1983
- [72] Schaub, Leiter Architektur SBB; Eicher + Pauli AG: SBB Energie 2000 Umsetzungsprogramm Energie in Hochbauten, Schlussbericht 2000
- [73] Th. Weisskopf, Urs Kaufmann, Edgar Däppen: Fitness-Programm für unsere Bahnhöfe, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 48, November 1994
- [74] Info Energie, B17/90: Düsenstrahl Lüftung senkt Heizkosten der SBB - Lok - Werkstätte in Bellinzona, SBB, 1990
- [75] Info Energie, B35/93: Deckenventilatoren senken Heizkosten des SBB - Zentral-lagers in Olten, SBB, 1993
- [76] Info Energie, B39/94: Neue Energietechniken zur Wärme- und Kälteerzeugung des Bahnhofgebietes Luzern, SBB, 1994
- [77] N. Diefenbach: Ansätze und Kennwerte zur rationellen Energienutzung im Gebäu-debestand, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Dortmund / Bochum 2001
- [78] F. Ranft, Bernhard Frohn: Natürliche Klimatisierung, Energieagentur NRW (Her-ausgeber), Birkhäuser Verlag, 2004
- [79] G. Hausladen, Michael de Saldanha, Wolfgang Nowak, Petra Liedl: Einführung in die Bauklimatik, Ernst&Sohn Verlag, 2003
- [80] F. Vester: Die Kunst vernetzt zu denken, Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität, Erstauflage 1999 Deutsche Verlagsanstalt GmbH, 4. Auflage Deutscher Taschenbuch Verlag (dtv) 2004
- [81] L. Zhang, M.G. Helander, C.G. Drury: Identifying factors of comfort and discom-fort in sitting, Human Factors, 38 (3), 1996, Seite 377-389
- [82] Regelwerke der Deutschen Bahn AG, Konzernrichtlinie 954 9103, Seite 301, Be-leuchtungsanlagen im gleisnahen und / oder sicherheitsrelevanten Bereich; Licht-technische Anforderungen für Innenanlagen, Berlin, 2004
- [83] F. Kluge, E. Seebold: Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache, 23. Auf-lage, Walter de Gruyter, Berlin, 1999

Digitale Dokumente

- [84] DBRent: Serienmäßig mehr Mobilität inklusive BahnCard, Unternehmenspräsen-tation, 17.03.2003

- [85] K.-F. Rausch, Deutsche Bahn AG: Luftverkehr und Bahn im Wettbewerb 05.02.2003, TU Darmstadt
- [86] H. Böttger, Deutsche Bahn AG: Konzernpräsentation, Unternehmensbereich Personenverkehr, 2003
- [87] Ruschhaupt, Deutsche Bahn AG: Finanzkenngrößen, 2003
- [88] P. Seabright: The economics of passenger rail transport: A survey, Institut d'économie industrielle, 2003
- [89] W. Richter: Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Sommerlicher Kühlbetrieb, Forschung Projekt F 2071, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2007
- [90] E. Mayer: Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig?, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Klima, Luft- und Kältetechnik 34, 12, 575 - 577
- [91] Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik: Kenngrößen zu Beurteilung raumklimatischer Grundparameter, Potsdam 1999
- [92] T. Hahm, S. Wussow, L. Sitzki: Einsatz von CFD-Methoden in der Gebäudetechnik am Beispiel ausgewählter Projekte, TÜV Nord, 2007
- [93] G.W. Seunig: Raumklima und Behaglichkeit, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, Merkblatt Nr. 10, Stand 2004
- [94] F. Sick, Chr. Neiß: Thermische Behaglichkeit in Räumen mit Dachoberlichtern, FHTW Berlin, 2003
- [95] H.-P. Schettler-Köhler, Hans-Peter Lawrenz: Energieeinsparung contra Behaglichkeit?, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Forschungen Heft 121, Bonn 2007
- [96] Y.-S. Yoon, Statistische Untersuchungen zu Ermittlungsmethoden der Empfundenen Luftqualität, Dissertation, TU Berlin, 2004
- [97] G. Hausladen, Chr. Meyer: Optimierung der Anordnung von Heizflächen und Lüftungselementen mittels Strömungssimulation, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2004
- [98] W. Eiband: Modellraumprüfstand mit dynamischer Simulation klimatischer Einflussfaktoren zur Untersuchung von Raumheizsystemen, Dissertation, TU München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2004
- [99] R.T. Hellwig: Thermische Behaglichkeit - Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht, Dissertation, TU München, 2005
- [100] H. G. Schuster, Tageslichtsysteme im Spiegel der Nutzer, Dissertation, Universität Dortmund, 2006
- [101] M.A. Humphreys, Environmental temperature and thermal comfort; Energy, heating & thermal comfort, Lancaster 1978, BRE Building Research Series

- [102] I. Koch: Informationsverarbeitung und kognitive Ergonomie XI, Vorlesung im Wintersemester 2007/2008
- [103] K.E. Charles: Fanger's Thermal Comfort and Draught Models, Institute for research in Construction, ICR Research Report RR-162, Ottawa, Canada, 2003
- [104] T.H. Karyono: The applicability of the ISO 7730 (Fanger's comfort model) and the adaptive model of thermal comfort in Jakarta, Indonesia, Download am 12.02.2008, Jakarta, 2005
- [105] S. Froehlich, A. Wagner, M. Wambsganß, M. Schlums: Webbasiertes Verfahren zur vergleichenden Darstellung, Bewertung und Optimierung der Strom-, Wärme, und Wasserverbräuche in Verwaltungsgebäuden, PDF, 2003, www.enerkenn.de
- [106] N. Fisch: Integrale Gebäudeplanung, TU Braunschweig, www.igs.bau.tu-bs.de und www.tu-bs.de/institute/igs
- [107] H. Kimpel, Chr. Freund: Energiebericht 2002 Fraport, PDF, www.fraport.de/online/umwelt/de/jsp/umw_energie.jsp
- [108] M. Rettschlag, H. Thiem: Energiebericht 2002 Flughafen München GmbH, PDF-Datei, München, 2003
<http://www.munich-airport.de/de/company/facts/download/index.jsp>
- [109] M. Kappert, Chr. Precht, Sebastian Rabe, U. Röther, T. Werner: Interdisziplinäre Nutzerorientierte Nachhaltige Optimierung von Stoff- und Energieströmen im Gebäude (INNOSEG), Schlussbericht Gesamtprojekt, Fachhochschule Erfurt, Forschungszentrum Jülich GmbH, www.fh-erfurt.de/innoseg, Juni 2007
- [110] Th. Hähner, H. Korreng, H.-G. Schmitz: Energieaudit für DB Station&Service AG, Bahnhofsmanagement Braunschweig, Braunschweig Hbf, DB Energie Energiesparmanagement TYE 4, nicht veröffentlicht, 13.11.2003
- [111] M. Rettschlag, H. Thiem: Energiebericht 2002 Flughafen München, Abteilung TV Energieversorgung, München, 2003
- [112] K. Hanke: Energie von Verkehrsbauten, Karstadt Warenhaus AG, 1999, ergänzt 2004
- [113] S. Atthajariyakul, T. Leephakpreeda: Neural computing thermal comfort index for HVAC systems, School of Manufacturing Systems and Mechanical Engineering, Thammasat University, Thailand, 2005
- [114] P. Laforgue, B. Souyri, M. Fontoynt, G. Achard: Simulation of visual and thermal comfort related to daylighting and solar radiation in office buildings, Université de Savoie, Le Bourget de Lac Cédex, France, xxxx
- [115] H. Zhang, C. Huizenga, E. Arens, T. Yu: Modeling thermal comfort in stratified environments, Center for Environmental Design Research, University of California at Berkeley, USA, 2005
- [116] T. Han, L. Huang, S. Kelly, C. Huizenga, H. Zhang: Virtual Comfort Engineering, Center for the Built Environment, University of Berkeley, Californie, USA, 2001

- [117] LowEx Gruppe: Towards Sustainable Architecture, Action for Sustainability, The 2005 World Sustainable Building Conference in Tokyo, SB05 Tokyo, 2005, Internet Download am 11.09.2008, www.lowex.net
- [118] R. de Dear, G. Brager, D. Cooper: Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, FINAL REPORT ASHRAE RP- 884, Results of Cooperative Research between the American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., and Macquarie Research, Ltd., March 1997
- [119] DB Station&Service GmbH: Bahnhofssteckbrief Darmstadt Hbf, 2006
- [120] DB Station&Service GmbH: Bahnhofssteckbrief Köln Messe/Deutz, 2006
- [121] DB Station&Service GmbH: Datenbank Reisendenzahlen ausgewählter Bahnhöfe
- [122] J. Vollmer: Abstraktion der Wartehalle, Seminar „Systemische Bauplanung“, TU Darmstadt, 2005
- [123] S. Garbe, S. Zahran: Wohlfühlbahnhof Köln Deutz, Seminar „Wohlfühlbahnhof“, TU Darmstadt, 2007
- [124] S. Kasseckert: Wohlfühlbahnhof Darmstadt Hbf, Seminar „Wohlfühlbahnhof“, TU Darmstadt, 2007
- [125] H. Wang, J.K. Kearney, J. Cremer, P. Willemsen: Steering Autonomous Driving Agents Through Intersections in Virtual urban Environments, University of Iowa, University of Utah, International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods, 2004
- [126] C. Loscos, D. Marchal, A. Mayer: Intuitive Crowd Behaviour in Dense Urban Environments using Local Laws, University College London, École Polytechnique Paris, 2003
- [127] F. Feurtey: Simulating the Collision Avoidance Behavior of Pedestrians, University of Tokyo, Master's Degree Thesis, February 2000
- [128] D. Helbing, Illés Farkas, Tamás Vicsek: Simulating dynamical features of escape panic, TU Dresden, Eötvös University Budapest, 2000

Online Informationen

- [129] <http://de.wikipedia.org/wiki/Behaglichkeit>
- [130] [http://de.wikipedia.org/wiki/Gemeinde_\(Deutschland\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Gemeinde_(Deutschland))
- [131] http://www.bbr.bund.de/nm_115406/DE/ForschenBeraten/Stadtentwicklung/StadtentwicklungDeutschland/Tendenzen/StaedteDeutschland/staedte.html
- [132] <http://de.wikipedia.org/wiki/Funktionalit%C3%A4t>, Zugriff am 13.09.2008
- [133] <http://de.wikipedia.org/wiki/Effizienz>, Zugriff am 13.09.2008
- [134] <http://de.wikipedia.org/wiki/Energieeffizienz>, Zugriff am 13.09.2008
- [135] <http://de.wikipedia.org/wiki/Komfort>, Zugriff am 14.09.2008
- [136] <http://de.wikipedia.org/wiki/Ergonomie>, Zugriff am 14.09.2008
- [137] <http://lexikon.meyers.de/meyers/Komfort>, Zugriff am 14.09.2008
- [138] http://www.dgnb.de/fileadmin/downloads/DGNB_Handbuch_44S_20090423_online_DE.pdf, Zugriff am 12.05.2010